ETUDES PONCTUELLES SUR LA VERIFICATION
DU
CONTRÔLE DES ARMEMENTS N° 6

l'imagerie aérospatiale pour la vérification et le maintien de la paix : trois études

Document rédigé pour le compte de la Direction du contrôle des armements et du désarmement
Affaires extérieures et Commerce extérieur Canada, Ottawa (Ontario), Canada

La figure qui illustre la couverture s'inspire d'un hiéroglyphe représentant l'oeil pénétrant d'Horus, le tout-puissant dieu du ciel de l'ancienne Égypte. Divisé en parties, cet «oeil aérien» servait à calculer les fractions. Curieusement toutefois, plutôt qu'un nombre entier, ou parfait, la somme de ses parties égalait 63/64. De même, le processus de la vérification n'atteindra probablement jamais la perfection.

De nos jours, l'un des éléments essentiels du processus multilatéral de vérification aux fins du contrôle des armements est sans doute le système de télédétection qui, déployé dans l'espace, fait figure d'«oeil aérien» discret. Diverses méthodes de vérification, notamment l'utilisation de capteurs aéroportés et au sol, ainsi que certaines formes d'inspection sur place et de surveillance, ajoutent à l'efficacité de ce système basé dans l'espace. Comme l'oeil d'Horus, l'oeil de la vérification est la somme de tous ces moyens techniques. Il reste que la vérification matérielle ne constituera pas nécessairement une solution définitive. Il est même probable que le processus continuera d'être entaché d'une certaine incertitude. En conséquence, la vérification ne sera adéquate et efficace que si l'on fait appel à l'élément intangible qu'est le jugement, représenté par la partie cachée de l'oeil d'Horus.

Études ponctuelles sur la vérification du contrôle des armements

La Direction du contrôle des armements et du désarmement d'Affaires extérieures et Commerce extérieur Canada publie occasionnellement des études sur la vérification aux fins du contrôle des armements et du désarmement afin de diffuser, dans le cadre des travaux suivis que le ministère effectue dans ce domaine, les résultats de recherches indépendantes réalisées pour le compte de ce dernier.

Les opinions exprimées dans ce rapport sont personnelles et ne reflètent pas nécessairement celles d'Affaires extérieures et Commerce extérieur Canada ou du gouvernement du Canada.

An English version of this study is available.
To obtain a copy, please contact:

Arms Control and Disarmament Division
External Affairs and International Trade Canada
Tower A, 6th Floor
125 Sussex Drive
Ottawa, Ontario
Canada
K1A 0G2

Affaires extérieures et Commerce extérieur Canada
N° de cat. E54-8/6-1991F
ISBN 0-662-96599-X
ISSN 0840-7983

Mars 1991

91-03900/

Imagerie aérospatiale pour la vérification et le maintien de la paix : trois études

par Allen V. Banner

Expert-conseil en vérification

du contrôle des armements

Document rédigé pour le compte de

la Direction du contrôle des armements et du désarmement

Affaires extérieures et Commerce extérieur Canada

Ottawa (Ontario), Canada

Données de catalogage avant publication (Canada)

Banner, Allen V. (Allen Vernon), 1955-
Imagerie aérospatiale pour la vérification et le maintien de la paix : trois études

(Études ponctuelles sur la vérification du contrôle des armements : nº 6)
Publication aussi en anglais sous le titre : Overhead imaging for verification and peacekeeping.
Comprend des références bibliographiques.
ISBN 0-662-96599-X
Nº de cat. MAS E54-8/6-1991F

1. Satellites artificiels en télédétection. 2. Reconnaissance aérienne. 3. Armement — Contrôle — Vérification — Télédétection. 4. Sécurité internationale — Télédétection. I. Canada. Direction du contrôle des armements et du désarmement. II. Titre

UA12.5.B3614 1991 621.36'78 C91-098525-1

Table des matières

	Page
Liste des tableaux	v
Liste des figures	vi
Résumé	viii
Abstract	ix
Remerciements	x
Liste des abréviations	xi
INTRODUCTION	1
PARTIE 1. Systèmes commerciaux de télédétection	2
Satellites imageurs	3
SPOT	3
Landsat	6
Soyuzkarta	7
Systèmes aéroportés	8
Capteurs aériens	8
Plates-formes aériennes	13
PARTIE 2. La détection de variation, à l'aide des images recueillies par des satellites commerciaux, pour contrôler les grands massifs de forces conventionnelles	16
Contexte	16
Images servant à détecter les variations	16
Le contrôle des avions	17
Le contrôle des hélicoptères	21
Le contrôle des véhicules et des équipements	22
Discussion	22
PARTIE 3. Utilisation des images recueillies par les satellites commerciaux, aux fins de la préparation et de la planification des missions de maintien de la paix	24
Contexte	24
Information ayant servi à planifier les opérations de maintien de la paix en Namibie	24
Discussion	29

PARTIE 4. Les systèmes aéroportés commerciaux employés pour le contrôle dans le contexte de la vérification ou du maintien de la paix 31
Contexte 31
Le contrôle avec des capteurs aéroportés commerciaux 32
Discussion 41

CONCLUSION 42

NOTES 43

BIBLIOGRAPHIE 45

Liste des tableaux

		Page
Tableau 1 :	Caractéristiques des capteurs du SPOT	3
Tableau 2 :	Caractéristiques des capteurs du Landsat	6
Tableau 3 :	Caractéristiques des capteurs du Soyuzkarta	8
Tableau 4 :	Contrôle à l'aide de télécapteurs	9
Tableau 5 :	Critères utilisés pour choisir un capteur infrarouge en vue d'une mission de reconnaissance	10
Tableau 6 :	Performances de certains avions	14
Tableau 7 :	Comparaisons entre les frais d'utilisation de certains avions (en dollars US de 1985)	15

Liste des figures

		Page
Figure 1 :	Caractéristiques spectrales de sources d'énergie, de transmissions atmosphériques et d'appareils courants de télédétection	2
Figure 2 :	Corridors et bandes terrestres observables grâce à des prises de vue verticales et obliques	4
Figure 3 :	Répétitivité du satellite SPOT	5
Figure 4 :	Fonctionnement d'un scanneur linéaire aéroporté	11
Figure 5 :	Détermination de la résolution, dans le cas des radars à ouverture synthétique et réelle	13
Figure 6 :	Changements observés dans une zone au nord de l'aéroport de Kaboul, grâce à une détection de variation	18
Figure 7 :	Changements observés à l'aéroport de Kaboul grâce à une détection de variation	19
Figure 8 :	Changements observés au campement N.-E., à Kaboul, grâce à une détection de variation	20
Figure 9 :	Comment les images recueillies par satellite commercial permettent de mettre les cartes à jour	25
Figure 10 :	Image panchromatique recueillie par le SPOT et montrant la base aérienne sud-africaine d'Ondangwa (Namibie)	26
Figure 11 :	Image panchromatique de Leopard Valley (Namibie), recueillie par le SPOT	27
Figure 12 :	Image panchromatique de Windhoek, recueillie par le SPOT et montrant la zone où est installé le quartier général du GANUPT	28

Figure 13 : Les photographies aériennes conventionnelles constituent une source économique et fiable d'informations 32

Figure 14 : Les appareils photos portatifs peuvent fournir des vues obliques très détaillées 33

Figure 15 : Photographie aérienne panchromatique prise de jour, et images recueillies de nuit par un scanneur linéaire infrarouge thermique 34-35

Figure 16 : Images de navires marchands obtenues à l'aide d'un FLIR 36

Figure 17 : Images d'aéronefs à une base militaire, obtenues à l'aide d'un scanneur linéaire infrarouge thermique 37

Figure 18 : Images d'un aérodrome recueillies par un radar à ouverture synthétique (ROS) 38

Figure 19 : Images de destroyers à l'ancre, recueillies par un ROS 39

Figure 20 : Utilité potentielle des images obtenues par radar à ouverture synthétique, pour la surveillance des zones frontalières 40

Résumé

Le présent document porte sur les systèmes aérospatiaux civils existants de télédétection et sur les façons dont on pourrait s'en servir à des fins reliées à la sécurité internationale. Il fournit des renseignements sur les systèmes aériens et montés sur satellite, pour en expliquer en gros le fonctionnement et les caractéristiques. L'auteur recourt à deux études de cas pour examiner les applications possibles des images obtenues par les satellites commerciaux. Dans la première, il se sert des images recueillies pendant le retrait des troupes soviétiques de l'Afghanistan, en 1988 et 1989, pour vérifier si les images saisies par les satellites commerciaux aideraient à contrôler les retraits de grande envergure opérés par des forces armées conventionnelles. Dans la deuxième, l'auteur présente des images de certains endroits en Namibie et en Angola et se demande si de tels clichés auraient été utiles aux Nations Unies dans le cadre des opérations de maintien de la paix qu'elles ont menées là-bas. Il s'interroge aussi sur des applications possibles des systèmes aéroportés de télédétection et se sert d'images recueillies antérieurement pour montrer les genres de résultats que des systèmes commerciaux existants permettraient d'obtenir.

Les résultats décrits dans le présent document montrent clairement que les systèmes commerciaux de télédétection peuvent fournir des renseignements précieux aux fins de certaines applications afférentes à la sécurité internationale. Ils révèlent aussi qu'il faut choisir soigneusement les applications, pour s'assurer que les systèmes commerciaux actuels de télédétection pourront effectivement fournir les données voulues.

Abstract

This paper examines commercially available overhead remote sensing systems and the ways they might be usefully employed for applications related to international security. An introduction is provided on commercially available satellite and aerial remote sensing systems to explain their basic operating characteristics and features. Two case studies are used to examine potential applications of commercial satellite imagery. In the first, imagery acquired during the Soviet withdrawal from Afghanistan in 1988 and 1989 is used to assess whether commercially available satellite imagery would be useful for monitoring large-scale withdrawals of conventionally armed forces. In the second case study, imagery of selected sites in Namibia and Angola is used to examine whether such imagery could have supported United Nations peacekeeping operations in those countries. Potential applications of airborne remote sensing systems are also examined using previously acquired imagery to show the kinds of results that could be obtained using commercially available systems.

The results outlined in this paper clearly demonstrate that commercial remote sensing systems can provide valuable information for certain applications related to international security. They show equally that the applications must be chosen carefully to ensure that the required data can be provided by current commercial remote sensing systems.

Remerciements

Le travail décrit dans la présente publication est fondé sur des études menées au nom d'Affaires extérieures et Commerce extérieur Canada (Programme de recherche sur la vérification) par deux entreprises se spécialisant dans l'application des systèmes commerciaux de télédétection. Les études ont été exécutées entre 1988 et 1990. Le cabinet *Banner & Associates* a réalisé celles qui sont décrites dans les Parties 2 et 3, qui concernent l'application des images recueillies par les satellites commerciaux actuels. *Intera Technologies Limited* a effectué, avec la participation de *Banner & Associates*, l'étude présentée dans la Partie 4, laquelle porte sur les systèmes aéroportés de télédétection.

L'auteur tient à remercier *Intera Technologies Limited*, le major A.G. McMullen, le lieutenant-colonel R.B. Mitchell (retraité) et D. Dorschner (*Aviation Resource Management*), pour leur contribution à la réalisation du présent document. L'auteur s'en voudrait par ailleurs de ne pas mentionner l'encouragement, la patience et le soutien que lui ont témoignés les membres de l'Unité de la recherche sur la vérification, d'Affaires extérieures et Commerce extérieur Canada.

Liste des abréviations

ADC	Angle de champ
DOMSAT	Satellite national de communications de RCA
DTC	Dispositif à transfert de charge
EOSAT	*Earth Observation Satellite Company*
EROS	Système d'observation des ressources terrestres
FCE	Forces conventionnelles en Europe
FLIR	(Radar) détecteur infrarouge à balayage vers l'avant
GANUPT	Groupe d'assistance des Nations Unies pour la période de transition
HRV	Haute résolution dans le visible
INM	Mille marin international
IR	Infrarouge
MONUY	Mission d'observation des Nations Unies au Yémen
P	Image panchromatique (relevée par le SPOT)
PP	Produits pétroliers
P + XS	Image fournie par le SPOT; elle résulte d'une fusion d'images panchromatiques (P) et multispectrales (XS) d'un endroit donné, obtenues simultanément.
ROR	Radar à ouverture réelle
ROS	Radar à ouverture synthétique
SLAR	Radar aéroporté à balayage latéral
SMB	Scanneur multibande

SPOT	Satellite pour l'observation de la Terre
SRDS	Stations à réception directe du SPOT
TDRS	Satellite-relais de poursuite et d'acquisition de données
TM	Capteur TM (appareil de cartographie thématique)
XS	Image multispectrale (relevée par le SPOT)

Introduction

Le présent rapport résume les résultats d'études menées, pour le Programme de recherche sur la vérification d'Affaires extérieures et Commerce extérieur Canada, sur la possibilité d'utiliser les systèmes imageurs aérospatiaux existants pour exercer des contrôles dans le cadre de la vérification de l'observance des accords sur la limitation des armements, d'opérations de maintien de la paix, ou d'activités semblables.

La première étude vise à déterminer si les satellites imageurs commerciaux pourraient servir à vérifier les retraits massifs de forces conventionnelles. Le cas retenu à cet égard est le retrait d'Afghanistan des troupes soviétiques, en 1988 et 1989. On a obtenu des images de Kaboul (Afghanistan) avant et après la première étape du retrait soviétique. Les spécialistes analysent les changements observés sur les images pour évaluer la mesure où ils pourraient effectivement confirmer le retrait.

Dans la deuxième étude, l'auteur emploie des clichés d'endroits en Namibie et en Angola pour voir si les images fournies par les satellites commerciaux peuvent révéler des renseignements utiles en vue de la planification initiale des opérations de maintien de la paix. L'étude cherche en particulier à établir si des renseignements intéressants sur l'infrastructure militaire et civile, plutôt que sur les forces militaires mêmes, peuvent transpirer des images émanant de satellites civils.

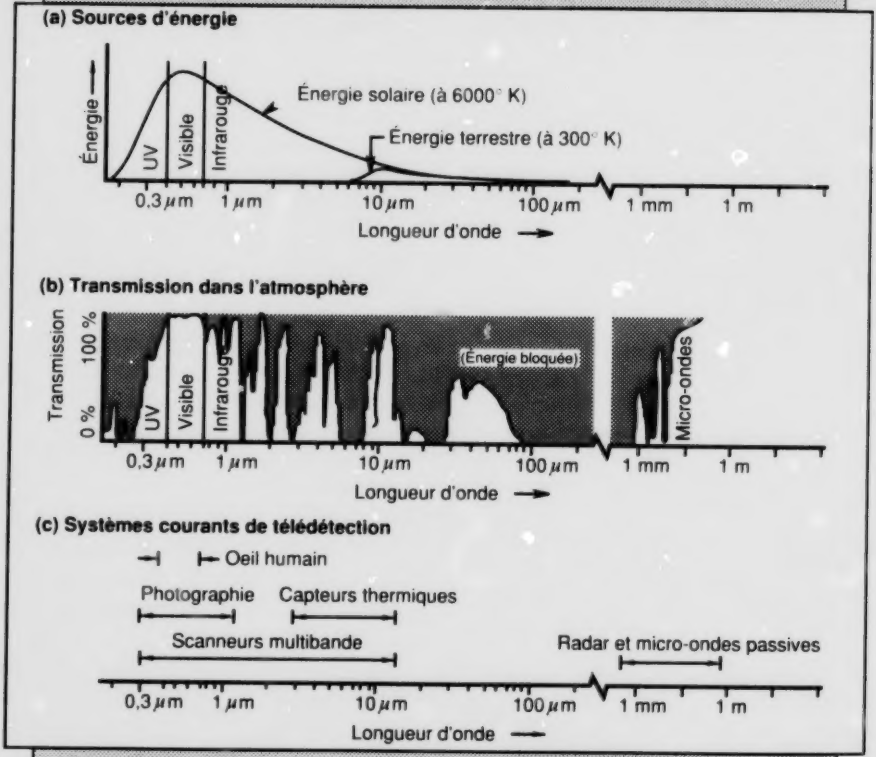
La troisième étude met l'accent sur les images produites par des systèmes aéroportés commerciaux plutôt que par des satellites imageurs. Elle examine comment on pourrait, avec les systèmes aériens commerciaux de télédétection qui existent actuellement, améliorer le contrôle et la reconnaissance aux fins du maintien de la paix et de la vérification de l'observance des accords sur la limitation des armements.

Partie 1 : Systèmes commerciaux de télédétection

La télédétection est la science et l'art d'obtenir de l'information sur un objet, une zone ou un phénomène en analysant des données relevées à l'aide d'un dispositif qui n'est pas en contact avec l'objet, la zone ou le phénomène en question.[1]

Le présent rapport examine les utilisations possibles des capteurs civils existants, lesquels forment des images à partir de l'énergie électromagnétique émise ou réfléchie par divers éléments du relief terrestre. Ces appareils peuvent capter l'énergie dans diverses bandes du spectre (ultraviolet,

Figure 1 Caractéristiques spectrales de sources d'énergie, de transmissions atmosphériques et d'appareils courants de télédétection



Remarque : l'échelle des longueurs d'ondes est logarithmique. (Tiré de *Remote Sensing and Image Interpretation*, par Thomas M. Lillesand et Ralph W. Kiefer, p. 11. Reproduit avec l'autorisation de John Wiley & Sons, Inc. Tous droits réservés.)

visible, infrarouge réfléchi, infrarouge thermique, ou micro-ondes). La figure 1 montre les types d'énergie électromagnétique en question, les longueurs d'onde correspondantes, et la gamme de longueurs d'onde auxquelles les divers systèmes de détection sont sensibles. La lumière visible, à laquelle nos yeux réagissent, correspond à une petite partie (de 0,4 µm à environ 0,7 µm) de l'ensemble du spectre électromagnétique.

Satellites imageurs

Pour la limitation des armements ou les opérations de maintien de la paix, on peut envisager de recourir à trois sources d'images émanant de satellites commerciaux. La société française SPOT-Image vend des clichés obtenus grâce au satellite SPOT; la maison EOSAT (*Earth Observation Satellite Company*) commercialise les images recueillies par le satellite américain Landsat; et enfin, *Soyuzkarta* offre des images relevées par plusieurs satellites imageurs soviétiques.[2]

SPOT

Le satellite français SPOT-1 (Satellite pour l'observation de la Terre) est muni de deux capteurs à haute résolution dans le visible (HRV) qui, en mode multibande, fournissent des images d'une résolution d'environ 20 m sur 20, ou des images d'une résolution approximative au sol de 10 m sur 10 en mode panchromatique.

Le tableau 1 montre les caractéristiques des capteurs HRV du SPOT. Le mode panchromatique est destiné aux usagers ayant besoin de fins détails géométriques. On a optimisé les bandes du mode multispectral pour analyser la végétation, qui produit habituellement une réaction maximale dans le vert, une forte absorption dans le rouge, et une pointe dans le proche infrarouge.

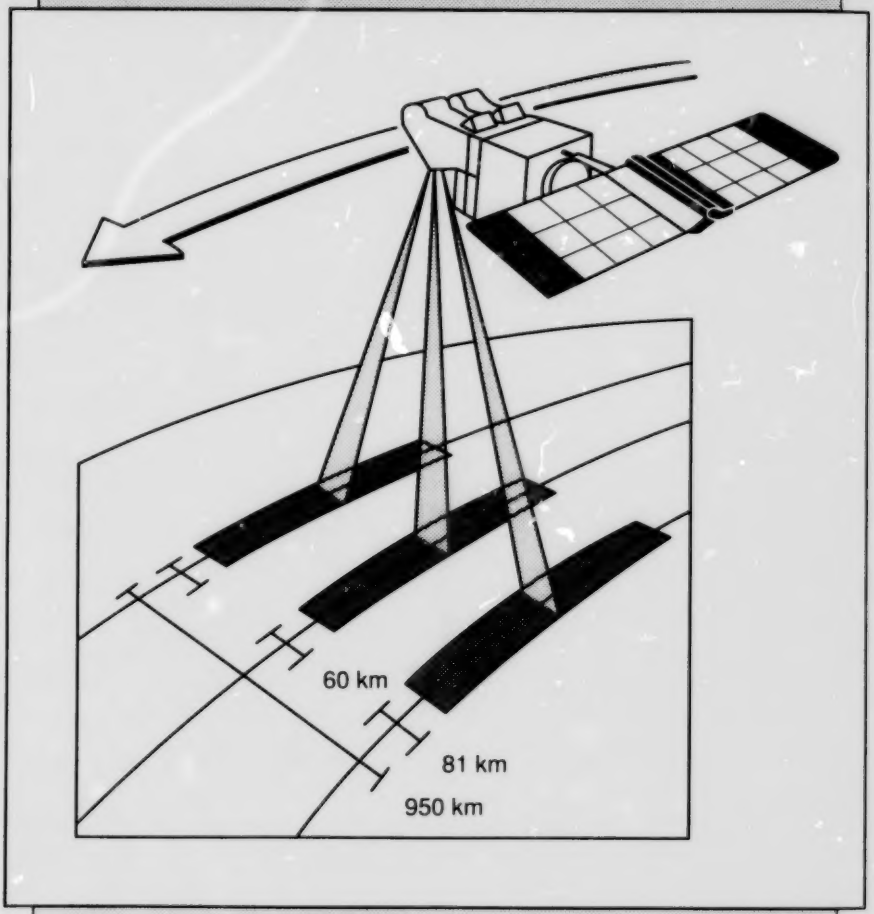
Les capteurs HRV peuvent s'ajuster à des angles d'observation allant jusqu'à 27 degrés par rapport à la verticale. Depuis le sol, on peut diriger le miroir de sélection de balayage de manière à lui faire observer des zones ne se trouvant pas directement sous le satellite, à condition que celui-ci survole un corridor

Tableau 1

Caractéristiques des capteurs du SPOT

	Mode panchromatique	Mode multispectral
Corridor de balayage	60 – 81 km	60 – 81 km
Résolution spatiale	10 – 13,5 m	20 – 27 m
Bandes spectrales	0,51 – 0,73 µm	0,50 – 0,59 µm (vert) 0,61 – 0,68 µm (rouge) 0,79 – 0,89 µm (proche IR)
Résolution radiométrique	64 niveaux de gris	256 niveaux de gris

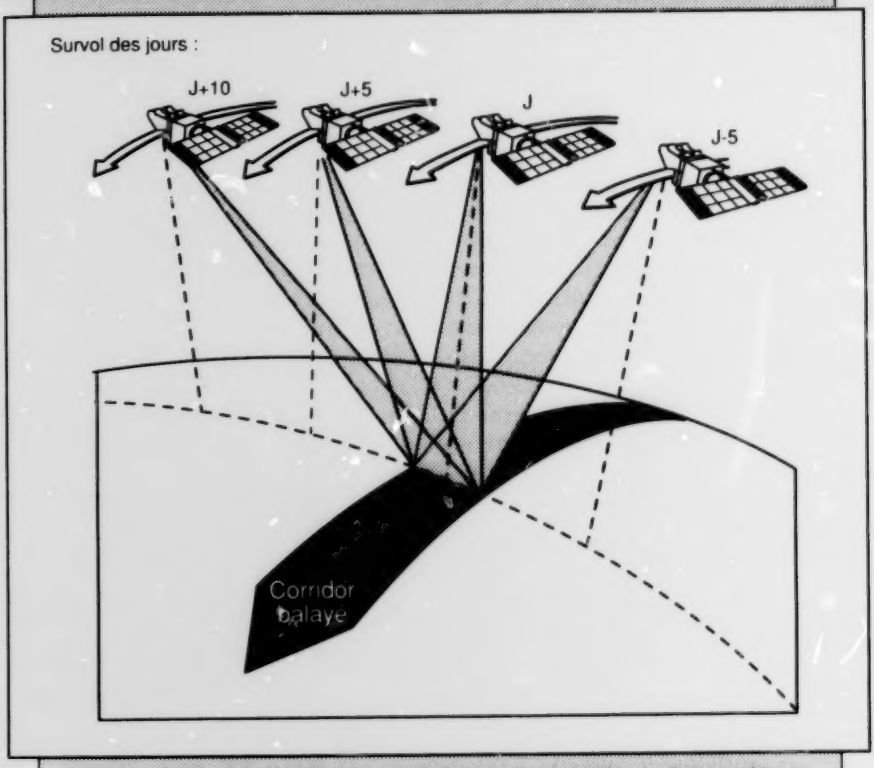
Figure 2 Corridors et bandes terrestres observables grace à des prises de vue verticales et obliques



(Gracieuseté de la société SPOT-Image)

observable de 950 km de largeur, dont l'axe central correspond à la projection au sol de la trajectoire du satellite. La largeur de la zone photographiée au sol varie de 60 km, si la zone s'étend directement sous le satellite, à 81 km, si l'appareil prend des photos obliques (Figure 2). La longueur des zones visées demeure constante, soit environ 60 km.

Figure 3 Repetitivite du satellite SPOT



Comme le SPOT peut recueillir des images obliques, il est possible de photographier un même endroit plus souvent qu'à tous les 26 jours (cycle orbital du SPOT). (Gracieuseté de la société SPOT-Image)

Si le satellite ne pouvait prendre des vues qu'à la verticale, il ne serait possible de photographier un endroit particulier qu'une fois pendant son cycle orbital de 26 jours. Comme le SPOT est à même de recueillir des images en oblique, il peut photographier un même lieu plus souvent (Figure 3).[3] À une latitude de 45 degrés, on peut obtenir jusqu'à 12 images pendant un cycle orbital de 26 jours, l'intervalle étant d'un à quatre jours entre la prise de deux images successives.[4]

Les prises de vue obliques réduisent par ailleurs la résolution spatiale des images. À l'angle d'observation maximal, le pas d'échantillonnage linéaire de l'image brute (dans l'axe perpendiculaire à la trajectoire du satellite) est de 13,5 m,

dans le cas des images panchromatiques, et de 27 m, dans celui des images multispectrales.[5] Dans l'axe longitudinal, la variation de l'angle d'observation n'influe en rien sur le pas d'échantillonnage des colonnes.

On produit les clichés SPOT grâce à deux réseaux de stations de réception d'images. Le réseau décentralisé comprend les stations à réception directe du SPOT (SRDS), situées un peu partout dans le monde. Celles-ci produisent les images surtout pour leurs propres fins, mais elles peuvent aussi en fournir à SPOT-Image. Les SRDS ne peuvent recevoir des images qu'en direct, et celles-ci sont obtenues pendant que le satellite est à portée de la station réceptrice.[6] Le réseau central compte deux emplacements : Toulouse, en France, et Kiruna, en Suède. Ces stations produisent des images pour SPOT-IMAGE et sa filiale suédoise Satimage. Elles sont à même de recueillir des images de n'importe où dans le monde, grâce à des enregistreurs de bord et à des appareils de relecture.

Landsat

Le satellite américain Landsat 5 est muni de deux principaux capteurs imageurs, à savoir le scanneur multibande (SMB) et l'appareil de cartographie thématique, ou capteur TM. Le tableau 2 montre les caractéristiques des deux capteurs. Ces derniers ne peuvent photographier qu'à la verticale, de sorte que la répétitivité du satellite n'est que de 16 jours, à condition qu'il n'y ait pas de couche nuageuse.

Tableau 2

Caractéristiques des capteurs du Landsat

	Scanneur multibande	Capteur TM
Corridor de balayage	185 km	185 km
Résolution spatiale	79 m × 79 m	30 m × 30 m
Bandes spectrales		0,45 – 0,52 µm (bleu)
	0,50 – 0,60 µm	0,52 – 0,60 µm (vert)
	0,60 – 0,70 µm	0,63 – 0,69 µm (rouge)
	0,70 – 0,80 µm	0,76 – 0,90 µm (proche IR)
	0,80 – 1,10 µm	(proche IR)
		1,55 – 1,75 µm (IR moyen)
		10,50 – 12,50 µm (IR thermique)*
		2,08 – 2,35 µm (IR moyen)
Résolution radiométrique	64 niveaux gris	256 niveaux gris

* La bande infrarouge thermique est moins précise (résolution spatiale : 120 m) que les autres bandes.

Le scanneur multibande compte quatre bandes, et il est en gros sensible au vert, au rouge et à deux bandes de la lumière du proche infrarouge.[7] La limite de résolution spatiale d'environ 56 sur 80 m est faible, comparativement à ce qu'offrent les autres systèmes. Cependant, si le degré de précision est suffisant à l'utilisateur, le recours au SMB est plus économique, car le corridor de balayage de ce dernier mesure 185 km de largeur, et le coût par image est dès lors moindre.

Les images du capteur TM présentent des bandes supplémentaires offrant une limite de résolution spectrale, spatiale et radiométrique plus fine. Les bandes 2, 3 et 4 de cet appareil correspondent à peu près aux trois bandes multispectrales du SPOT. La bande 1, qui est sensible à la lumière bleue dont la longueur d'onde va de 0,45 à 0,52 µm, permet de pénétrer davantage les plans d'eau. La bande 5, sensible à la lumière de l'infrarouge moyen (de 1,55 à 1,75 µm), a pour rôle de recueillir de l'information sur la teneur des récoltes en eau et sur le taux d'humidité du sol. La bande 7 (de 2,08 à 2,35 µm) est importante pour distinguer les formations rocheuses. La bande 6, bande infrarouge thermique sensible au rayonnement de 10,40 à 12,50 µm, est utile pour analyser toute une gamme de phénomènes ayant une signature thermique évidente.

Un réseau mondial de stations réceptrices terrestres reçoit directement les images recueillies par le Landsat. Quand celui-ci est à portée optique d'une station réceptrice, les données lui sont transmises en temps réel. Il est également possible de transmettre les images TM ou SMB du Landsat à EOSAT, au Centre des données du Système d'observation des ressources terrestres, à Sioux Falls (Dakota du Sud), grâce au satellite-relais de communication du Système de poursuite et d'acquisition de données (TDRS) et au satellite national de communications de RCA (DOMSAT).

Soyuzkarta

Soyuzkarta offre des images obtenues à l'aide d'appareils photographiques KFA-1000 et MK4. Le tableau 3 décrit les caractéristiques de ces derniers. On dit que ces deux appareils possèdent une limite de résolution spatiale de près de cinq mètres. Les images sont enregistrées sur une pellicule photographique. On réalise ensuite des images numériques en chiffrant les pellicules. Les deux caméras produisent un chevauchement nord-sud de 60 % d'une scène à l'autre, ce qui permet une vue stéréoscopique des clichés.

Les photos KFA-1000 sont offertes en mode panchromatique ou en couleurs. Le film couleurs comporte des bandes spectrales et deux couches d'émulsion. La couleur du produit final dépend du choix des filtres utilisés pendant le développement du film. Les échelles initiales sont d'environ 1:250 000 sur un film de 30 cm sur 30, ce qui couvre un secteur d'environ 50 km sur 50. On peut obtenir des échelles photographiques aussi grandes que 1:25 000.

Tableau 3

Caractéristiques des capteurs du Soyuzkarta

	KFA-1000	MK-4
Nombre de canaux	1	4
Distance focale	1000 mm	300 mm
Dimensions du cliché	300 × 300 mm	180 × 180 mm
Échelle initiale*	1:220 000 à 1:280 000	1:6 500 000 à 1:1 500 000
Recouvrement longitudinal	60 %	60 %
Corridor de balayage	120 km ou plus (2 appareils photos)	120 – 270 km
Bandes spectrales	0,560 – 0,670 µm 0,760 – 0,810 µm	0,635 – 0,690 µm 0,810 – 0,900 µm 0,515 – 0,565 µm 0,460 – 0,505 µm 0,580 – 0,800 µm 0,400 – 0,700 µm
Résolution spatiale	5 m	6 m

* Selon l'altitude

Le MK-4 est l'appareil photographique le plus perfectionné que les Soviétiques emploient pour la cartographie grand format. C'est un appareil multispectral enregistrant quatre images en noir et blanc, que l'on peut ensuite combiner pour produire une image en couleurs. Les clichés sont enregistrés à une échelle initiale d'environ 1:700 000, sur un film de 19 cm sur 19. Il est possible d'atteindre une échelle aussi grande que 1:25 000.

Systèmes aéroportés

Les systèmes aéroportés commerciaux de télédétection pourraient s'avérer précieux aux fins de la limitation des armements et du maintien de la paix. Divers capteurs et plates-formes pourraient convenir dans ces contextes.

Capteurs aériens

Les principales catégories de capteurs sont les suivantes : les appareils photographiques, les systèmes infrarouges thermiques, et les radars imageurs. Le tableau 4 montre quelques-unes des principales caractéristiques de chaque type.

La photographie classique, réalisée avec un appareil aérien standard, représente une option économique et fiable. Les systèmes photographiques peuvent fournir des détails spatiaux très précis. Les appareils photos aériens et leurs films coûtent peu, comparativement à de nombreux autres systèmes. Il est facile de produire des épreuves pour utilisation sur les lieux.

Tableau 4

Télédétecteurs employés pour la surveillance

Capteurs	Caractéristiques
Photographie	résolution spatiale très élevée par temps clair, ciel dégagé il faut développer le film
Infrarouge thermique	résolution spatiale acceptable de nuit ou de jour, ciel dégagé peut fournir des données en temps réel
Radar	piètre résolution spatiale de nuit ou de jour, ciel dégagé peut fournir des donnés en temps réel

Les systèmes photographiques présentent cependant divers désavantages. Ils ne fournissent pas de données en temps réel, et il faut développer les films avant de pouvoir interpréter les images. Le développement nécessite l'accès à une chambre noire, ce qui n'est pas pratique dans les régions éloignées ou isolées. Ces appareils donnent les meilleurs résultats pendant le jour, de préférence pendant la partie la plus éclairée de la journée, soit de 10 h à 14 h.[8] Enfin, les nuages posent de sérieux problèmes, car leur présence oblige à retarder le survol des zones visées ou réduit la valeur informative des photographies.[9]

Il existe sur le marché plusieurs sortes d'appareils de photographie aérienne, notamment la chambre métrique de prise de vues, l'appareil de reconnaissance à clichés de taille moyenne, et l'appareil portatif. Le premier permet de prendre des photos à grande échelle très détaillées, présentant peu de distorsion et une image totalement homogène. De nombreuses missions n'exigent pas une telle précision. On peut alors recourir à un appareil de reconnaissance de 70 mm, lequel est relativement peu coûteux, robuste, fiable et facile d'emploi, et nécessite peu d'entretien. Certains appareils portatifs sont expressément conçus pour prendre des photos aériennes en oblique. On y charge habituellement un film de 70 mm, soit un format assez grand pour permettre une interprétation poussée des images. Avec un tel appareil, on peut prendre des photos en oblique de haute qualité, à plusieurs kilomètres de distance.

Les capteurs infrarouges thermiques constituent une autre catégorie d'appareils imageurs aériens. Ils produisent des images en détectant l'énergie thermique dégagée par toutes les surfaces, en fonction de la température de chacune. Ils peuvent donc servir la nuit aussi bien que le jour. Ils réussissent mieux que les appareils photographiques à pénétrer brouillard et smog. Cependant, les rayonnements infrarouges thermiques ne peuvent percer les nuages; c'est donc par temps clair que les capteurs thermiques fournissent les meilleurs résultats.[10]

Tableau 5

Critères utilisés pour choisir un capteur infrarouge en vue d'une mission de reconnaissance

Capteurs IR linéaires (IRLS)	Capteurs FLIR
• Sortie sur papier requise	• Sortie de l'image en temps réel sur moniteur requise
• Mesure et analyse de l'image requises	• Mesure et analyse de l'image non nécessaires
• Préférence pour balayage continu dans un angle de champ large, perpendiculairement à la trajectoire de l'aéronef	• Préférence pour un angle de champ étroit qui montre l'objectif en détail
• Le technicien ne peut pas ou presque pas orienter le capteur	• Le technicien peut orienter le capteur dans la direction voulue
• Le capteur risque de limiter les manoeuvres de l'aéronef (vitesse/altitude)	• L'utilisation du capteur ne limite en rien les manoeuvres du pilote (vitesse/altitude)

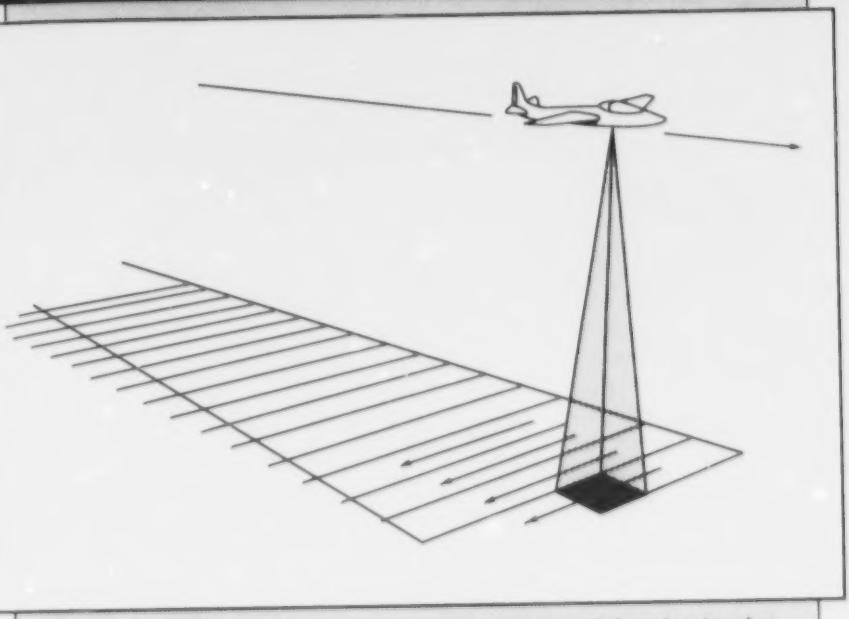
* William T. Noel, «Utilization of IR Imagery in Tactical Reconnaissance», dans *Aerial Reconnaissance Systems — Pods/Aircraft* (sous la direction de E. Shea). The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers : 24-25 mars 1976, Reston, Virginie, vol. 79, 1976, pp. 99-100.

Les scanneurs linéaires IR thermiques et les systèmes IR à balayage vers l'avant (FLIR) sont également employés pour la reconnaissance aérienne. Les deux sortes de capteurs sont destinés à des missions différentes. Le tableau 5 montre dans quelles situations l'utilisation de chaque appareil est indiquée.

Les systèmes FLIR produisent des clichés thermiques en temps réel, semblables aux images d'un magnétoscope. On y recourt habituellement pour observer une scène ou des objectifs particuliers en oblique. Les systèmes conçus pour les missions de reconnaissance comportent une tête détectrice montée sous l'aéronef, tête qu'un technicien, muni d'un vidéo-typographie et des commandes appropriées, peut diriger vers les points intéressants depuis l'intérieur de l'aéronef. La plupart des systèmes FLIR possèdent plusieurs angles de champ (ADC). Un bon appareil de cette catégorie fournira une très haute résolution spatiale, dans son plus petit ADC.

Les scanneurs IR linéaires utilisent un miroir et des dispositifs optiques rotatifs pour diriger l'énergie thermique depuis une petite surface au sol jusqu'à un détecteur ou réseau de détecteurs. Le miroir tourne perpendiculairement à

Figure 4 Fonctionnement d'un scanneur linéaire aéroporté



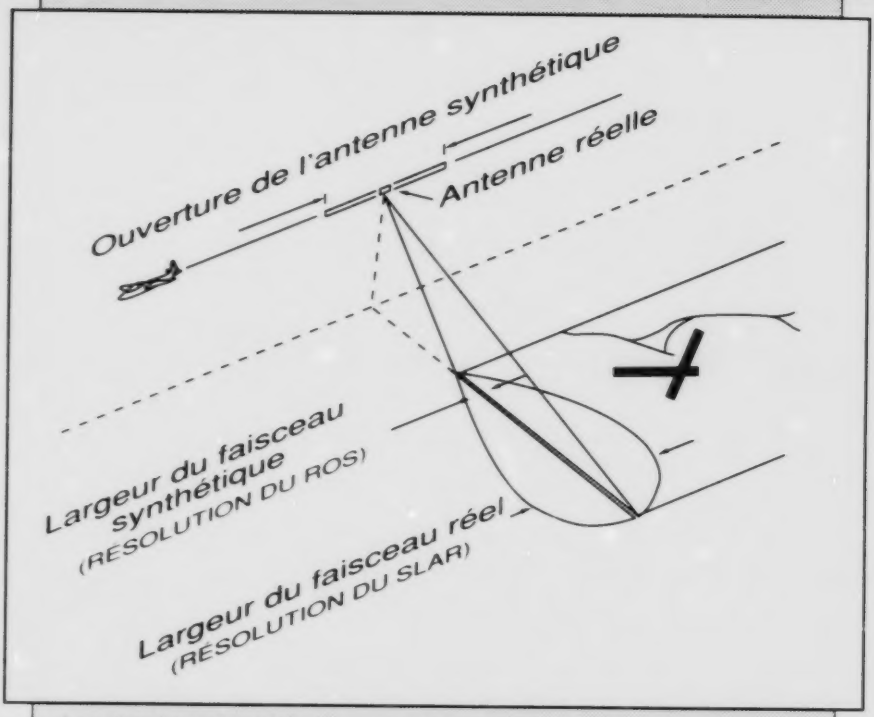
Un miroir tournant perpendiculairement à l'axe de vol permet de balayer le sol par bandes successives. De plus, les bandes sont adjacentes, car l'aéronef se déplace. [(c) 1979 Board of Regents of the University of Wisconsin System. Tous droits autorisés.]

l'axe de vol. À chaque cycle du miroir, une bande au sol, située à la normale de la trajectoire de vol, est balayée. Comme l'aéronef se déplace vers l'avant, des balayages successifs couvrent les bandes adjacentes à la première au sol, ce qui crée une image bidimensionnelle (Figure 4). On peut afficher les données en temps quasi réel sur un écran ou un papier photothermographique, pendant le survol. Cependant, on enregistre plutôt les données sur un ruban magnétique ou un autre support d'information, puis on les traite une fois l'aéronef rentré à sa base, pour obtenir ainsi les images à interpréter.

Aucun des capteurs décrits plus haut ne peut pénétrer les nuages, contrairement aux radars aéroportés, qui peuvent en outre servir de jour ou de nuit, car ils fournissent leur propre éclairement.

Le radar (abréviation formée à partir des mots anglais *ra*dio *d*etection *a*nd *r*anging, c'est-à-dire détection et télémétrie par radio-électricité) est un capteur actif qui émet de courtes ondes en hyperfréquences et qui enregistre ensuite les

Figure 5 Détermination de la résolution dans le cas des radars à ouverture synthétique et réelle



Les radars à ouverture réelle offrent une résolution spatiale limitée, car il y a une limite aux dimensions de l'antenne que l'on peut installer à bord d'un aéronef. Les radars à ouverture synthétique mettent à profit le mouvement de l'aéronef pour produire, par synthèse, l'effet d'une antenne qui mesurerait des centaines de mètres de longueur. L'antenne utilisée mesure un mètre seulement. (Gracieuseté de MacDonald Dettwiler and Associates Ltd.)

échos qu'il reçoit, dans l'ordre de réception. Les radars aéroportés sont appelés «radars aéroportés à balayage latéral» (SLAR); ils produisent des bandes continues d'images du terrain le long de la trajectoire de vol de l'avion.

Il existe deux principaux types de SLAR. Les radars à ouverture réelle (ou de vive force) (ROR) nécessitent une grande antenne afin de capter suffisamment de détails spatiaux pour produire les images correspondantes. Les radars à ouverture synthétique (ROS) obtiennent une plus grande précision spatiale, sans recourir

à une grosse antenne. Ils exploitent le déplacement de l'aéronef vers l'avant pour créer, synthétiquement, l'effet d'une antenne qui mesurerait des centaines de mètres de longueur (Figure 5).

Les radars font usage de rayonnements dont la longueur d'onde est de plusieurs ordres de grandeur plus grande que celle des rayonnements employés par les systèmes photographiques et infrarouges thermiques. Ce sont ces rayonnements à grande longueur d'onde qui confèrent aux radars imageurs leur capacité tous temps. En revanche, les détails spatiaux qu'ils enregistrent sont beaucoup moins fins que ceux relevés par les capteurs optiques. Dans le cas des ROS commerciaux existants, le degré de résolution spatiale se mesure en mètres, et non en centimètres.

Les ROS assurent un traitement numérique à bord en temps réel, de sorte qu'il est possible de voir immédiatement les images sur un écran-témoin vidéo, ou, quelques minutes plus tard, sur support en papier (papier photothermographique). On peut aussi transmettre les données à une station terrestre de réception, en temps réel. D'ordinaire, on enregistre les images sur une bande magnétique de manière à pouvoir les traiter et les analyser davantage plus tard.

Plates-formes aériennes

Les aéronefs civils peuvent convenir à de nombreuses tâches afférentes à la vérification et au maintien de la paix. Ces appareils possèdent des caractéristiques très diverses, et le coût varie énormément d'un modèle à l'autre. Règle générale, les avions dont le prix d'achat et les frais d'utilisation sont élevés offrent des conditions d'emploi moins restreintes, c'est-à-dire leurs capacités tous temps sont meilleures, la limite de leur plafond est plus élevée et ils ont de meilleurs systèmes de navigation. Parallèlement, il importe que les frais d'utilisation ne soient pas prohibitifs.

Pour convenir aux opérations de vérification ou de maintien de la paix, un aéronef doit répondre aux critères suivants :[11]

- posséder une capacité d'emport suffisante pour que l'on puisse y loger les capteurs, le matériel de traitement et les soutes nécessaires;
- posséder une bonne autonomie, compte tenu de la charge utile, de manière à pouvoir couvrir de grandes zones à chaque sortie;
- pouvoir voler à diverses altitudes, sans trop perdre de sa rentabilité ni de ses capacités opérationnelles;

Tableau 6

Performances de certains avions[1]

	Cessna Conquest[2]	de Havilland Dash 8 (Série 300)	Canadair Challenger
Masse brute maximale (lb)	10 800	39 000	41 100
Charge utile maximale (lb)	2 450	11 800	7 830
Charge utile avec quantité maximale de carburant[3] (lb)	1 500	9 122	5 375
Plafond théorique[4] (pi)	35 000	25 000	41 000
Vitesse de croisière maximale[5] (noeuds)	287	266	443
Distance franchissable[6] (INM)	2 100	2 500	3 040
Autonomie maximale[7] (h)	7,3	9,4	6,8
Distance franchissable maximale à 5 000 pi. (1 INM)	866	1 273	1 490
Distance de décollage au niveau de la mer (pi.)	2 465	3 700	5 750

1 Intera Technologies Ltd., «A Comparison of the Capabilities and Costs of Aircraft for an Iceberg Radar Surveillance Role», dans *Iceberg Detection by Airborne Radar: Technology Review and Proposed Field Program*, CANPOLAR Consultants Ltd., Environmental Studies Revolving Funds Report No. 045, septembre 1986, p. 231.
2 Un pilote, un technicien; l'équipage des deux autres avions comprend deux pilotes et un technicien.
3 La charge, ici, comprend un équipage de deux ou trois personnes et l'équipement de reconnaissance.
4 Le plafond théorique est proche du plafond de rendement optimal, sauf pour les avions à réaction, dont le plafond optimal est de 39 000 pieds environ.
5 À l'altitude optimale; la vitesse à moindre altitude est plus basse.
6 Nous supposons une charge maximale en carburant au décollage, avec conditions de vol à vue, et vol sans réservoir auxiliaire.

- pouvoir transporter des passagers (par exemple, des observateurs du pays survolé), sans perdre de ses moyens de surveillance;
- pouvoir décoller de la plupart des aérodromes; et
- être très fiable et comporter des frais d'exploitation peu élevés.

Le tableau 6 montre les performances de trois avions qui pourraient servir aux fins de la vérification ou du maintien de la paix : le *Cessna 441 Conquest*, le *Dash 8* de de Havilland (Série 300), et le *Challenger 600* de Canadair.[12] Le tableau 7 compare les frais d'utilisation des divers appareils, en dollars américains de 1985.

Le *Cessna Conquest* constitue une plate-forme rentable de télédétection. Il suffit d'y placer un équipage de trois personnes, des appareils photographiques aériens et un scanneur thermique, ou encore un radar à ouverture synthétique. Ce

Tableau 7

Comparaisons entre les frais d'utilisation de certains avions[2] (en dollars US de 1985)[1]

	Cessna Conquest[3]	de Havilland Dash 8 (Série 300)	Canadair Challenger
Portée spécifique (NM/lb de combustible)	0,67	0,44	0,18
Frais d'exploitation au plafond optimal[4]			
$/h	285	404	978
$/NM	1,00	1,52	2,21
Frais d'exploitation à 5 000 pi. (1 524 m) d'altitude[4,5]			
$/h	430	625	1515
$/NM	1,62	2,37	3,42

1 Les données fournies à l'origine en devises canadiennes de 1985 ont été converties en devises américaines selon le barème suivant : 1 $ CAN = 0,85 $ US.
2 Intura Technologies Ltd., op. cit., p. 232.
3 Un pilote, un technicien; l'équipage des deux autres avions comprend deux pilotes et un technicien.
4 Comprennent les frais d'entretien et de carburant, mais non les frais afférents à l'équipage.
5 Résultats calculés en supposant que la consommation de carburant double quand l'appareil passe de l'altitude optimale à 5 000 pieds (1 524 m). Les fabricants ne fournissant pas de statistiques sur le rendement maximal par rapport à l'altitude.

serait là des combinaisons valables d'appareils, car on pourrait ainsi conjuguer souvent, pour faciliter l'interprétation, les images thermiques recueillies la nuit aux photographies prises de jour. Les images ROS sont habituellement utilisées par elles-mêmes, surtout si la zone visée est constamment couverte de nuages.

Un *Dash 8* (Série 300) de de Havilland constituerait une bonne plate-forme polyvalente. Il est assez spacieux pour emporter une gamme complète de capteurs et de matériels connexes, tout en pouvant transporter une équipe d'inspecteurs. Son autonomie dépasse 2 000 milles marins internationaux et, vu ses caractéristiques ADAC, il s'accommoderait de la plupart des aérodromes.

Le *Challenger* de Canadair est un avion à réaction et peut donc franchir de longues distances rapidement. Tout comme le *Dash 8*, il est à même d'emporter des passagers et une gamme complète de capteurs. Les avions à réaction d'affaires, tels que le *Challenger*, présentent cependant plusieurs désavantages. Ils ont une vitesse de décrochage relativement élevée, ce qui limite leur capacité de prendre des images à grande échelle, vu que, pour cela, l'avion doit voler lentement et à faible altitude. À l'achat et à l'utilisation, les avions d'affaires à réaction, comme le *Challenger*, coûtent par ailleurs plus cher que des appareils turbopropulsés tels que le *Conquest* ou le *Dash 8*.

Partie 2 : La détection de variations, à l'aide des images recueillies par des satellites commerciaux, pour contrôler les retraits massifs de forces conventionnelles

Contexte

Ce projet avait pour objectif d'examiner le recours aux techniques de détection de variations pour contrôler les retraits massifs de forces conventionnelles à l'aide des images obtenues par des satellites commerciaux. Le retrait des forces soviétiques de l'Afghanistan, qui s'est opéré en 1988 et 1989, nous a servi de cas pour notre étude.

Les effectifs soviétiques ont dépassé les cent mille hommes à un moment donné au cours de l'occupation, qui a duré huit ans.[13] Avant le début du retrait, soit le 15 mai 1988, environ 22 000 soldats soviétiques se trouvaient censément dans les environs de Kaboul.[14] Le départ d'un si gros contingent a fourni l'occasion de voir dans quelle mesure les images obtenues par satellite commercial aideraient à contrôler les retraits de forces conventionnelles dans d'autres régions telles que l'Europe.

Le SPOT a photographié Kaboul à deux dates distinctes, l'une antérieure et l'autre postérieure à l'événement, de manière à permettre une analyse multitemporelle. L'image antérieure a été prise le 11 novembre 1987, à un angle d'observation de 7,9° O. L'image postérieure a été obtenue presque un an plus tard, soit le 4 novembre 1988, à un angle d'observation oblique de 26,2° E.

On s'est servi d'images panchromatiques (résolution de 10 m) pour l'analyse. On a superposé les images de 1987 et de 1988 grâce à un système de traitement numérique d'images. Pour ce faire, on transforme une des images de manière qu'elle corresponde géométriquement à l'autre. Une fois cette opération faite, on peut combiner les deux images panchromatiques à bande unique en une seule représentation en couleurs; on emploie les données de 1987 pour les bandes bleue et verte de l'image couleur, et les données de 1988, pour la bande rouge.

Images servant à détecter les variations

On peut recourir à deux images d'un même lieu prises à des dates différentes pour montrer les changements survenus entre-temps. Un cliché d'une zone située au nord de l'aéroport de Kaboul constitue un bon exemple pour illustrer comment il faut interpréter l'image des changements (Figure 6). L'image superposée

multitemporelle apparaît à la figure 6(c). Les figures 6(a) et 6(b) représentent les images panchromatiques obtenues en 1987 et 1988. L'image antérieure présente les bandes bleue et verte, et l'image postérieure, la bande rouge. Les changements entre les deux images sont traduits soit en rouge, soit en bleu pâle. Si, pour un pixel donné,[15] l'intensité est plus grande dans l'image de 1988 qu'au point correspondant dans l'image de 1987, le pixel paraît rouge dans l'image des changements. Les pixels dont la brillance a diminué de 1987 à 1988 figurent en bleu pâle.

L'image de 1988 montre deux immeubles (C1 et C2) qui ne figuraient pas dans l'image de 1987. La brillance des pixels a diminué de 1987 à 1988, ce qui fait paraître bleu pâle les nouveaux immeubles dans l'image des variations. Un élément clair est visible entre les nouveaux immeubles, dans l'image de 1988 (C3); ce sont sans doute les fondations d'un autre immeuble. Comme la brillance a augmenté de 1987 à 1988, ce secteur figure en rouge dans l'image des variations.

D'autres secteurs, tels que les points C4 et C5, sont également montrés en rouge ou en bleu pâle. Dans ces cas, cependant, les changements semblent dus à une évolution de la végétation d'une année à l'autre. Dans les zones agricoles, de nombreux changements révélés par les images seront attribuables aux transformations courantes des cultures. Les processus de prise de vue et d'analyse peuvent aussi expliquer certaines variations : par exemple, des erreurs commises dans la superposition des images panchromatiques, ou le fait que l'on ait omis de prendre en compte la différence dans la hauteur du soleil au moment des deux prises de vue, risquent de faire apparaître dans les régions montagneuses des changements qui, en fait, n'ont pas eu lieu.

L'accentuation des variations ne révèle que les différences d'intensité entre deux images. De nombreux facteurs influent sur les intensités de l'image, mais la plupart importent peu pour l'exécution des travaux d'interprétation. Une personne spécialisée dans l'interprétation des images doit repérer les changements importants et passer outre aux autres.

Le contrôle des avions

La figure 7 montre des images panchromatiques prises en 1987 et 1988, au-dessus de l'aéroport de Kaboul, et une image superposée multitemporelle de ce même endroit. Deux avions sont visibles au point A1 dans la figure 7(a). On peut vaguement discerner les formes générales des gros avions. Il en va de même des appareils situés au point A2 dans la figure 7(b). Cependant, si les avions sont petits, ou si le contraste visuel entre les avions et les environs est faible, les formes des avions ne seront pas évidentes. Les objectifs indiqués par les flèches au point A3 dans la figure 7(c) sont sans doute des avions. D'autres exemples sont fournis aux points A4 et A5, dans les figures 7(a) et 7(b) respectivement. Pour dire qu'il s'agit probablement là d'avions, il faut se fier à leur emplacement. Comme les

Figure 6 Changements observés dans une zone au nord de l'aéroport de Kaboul grâce à une détection de variation

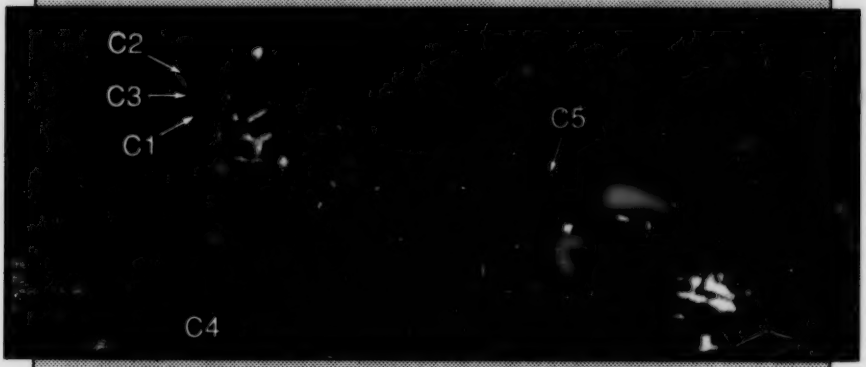
A

Image panchromatique prise en 1987

B

Image panchromatique prise en 1988

C



Superposition des deux images, permettant de détecter les changements (CNES, 1987-1988, distribution assurée par Spot-Image)

Figure 7 Changements observés à l'aéroport de Kaboul grâce à une détection de variation

Image panchromatique prise le 11 novembre 1987

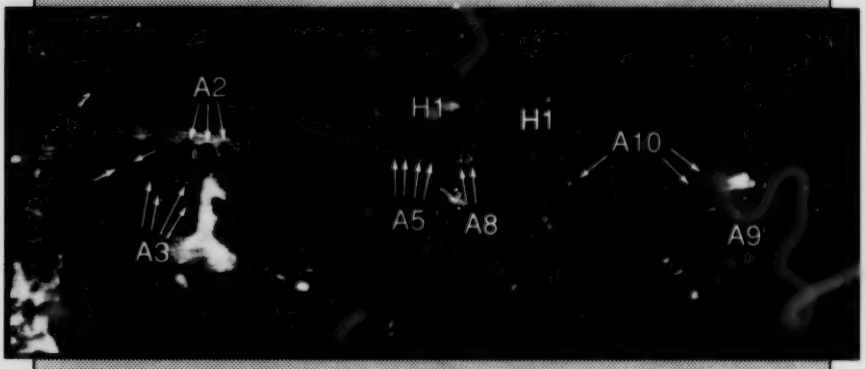


Image panchromatique prise le 4 novembre 1988

Superposition des deux images, permettant de détecter les changements
(CNES, 1987-1988, distribution assurée par Spot-Image)

Figure 8 Changements observés au campement N.-E. à Kaboul, grace à une détection de variation

A

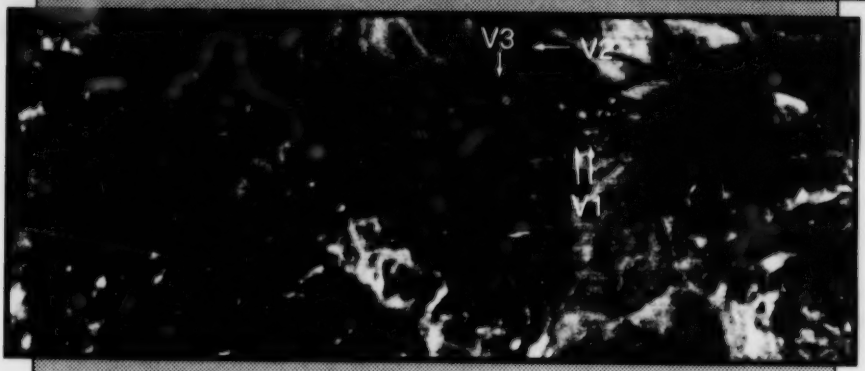
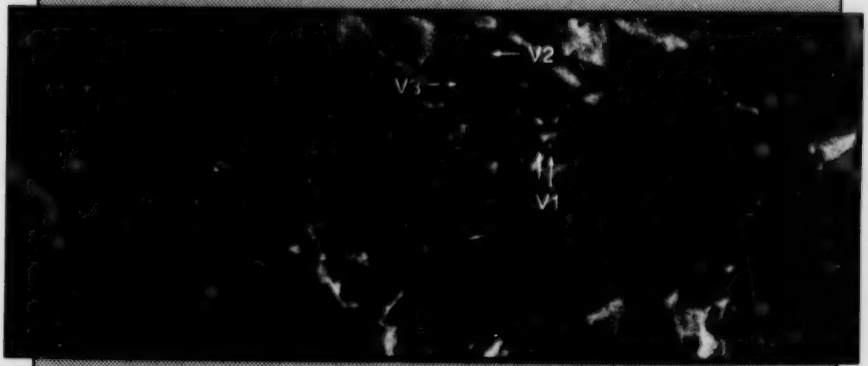


Image panchromatique prise le 11 novembre 1987

B

Image panchromatique prise le 4 novembre 1987

C



Superposition des deux images, permettant de détecter les changements
(CNES, 1987-1988, distribution assurée par Spot-Image)

formes des avions sont indiscernables, l'interprète doit se guider sur des indices moins fiables et indirects pour repérer les appareils.

La détection des variations peut aider l'analyste à distinguer les avions (qui, on suppose, se déplacent régulièrement) des éléments permanents de taille comparable. Par exemple, les avions au point A6 de la figure 7(c) figurent en rouge. On les voyait dans l'image de 1987 (point A4), mais non dans celle de 1988. Les avions situés au point A7 de la figure 7(c) sont montrés en bleu pâle; ils étaient dans l'image de 1988 (A2), mais non dans celle de 1987.

Les techniques visuelles de détection des variations sont utiles pour mettre en lumière les changements survenus, mais il faut alors interpréter les images avec prudence. Les secteurs où aucun changement n'apparaît peuvent aussi présenter un intérêt. Les éléments montrés au point A3 de la figure 7(b) ne sont pas évidents dans la figure 7(c). Ce peut être des avions, car ils sont foncés, tout comme les environs, dans l'image de 1988, mais ils n'y sont pas évidents. Les objets marqués A8 dans les trois images pourraient être des avions également. Comme il y avait quelque chose à cet endroit quand les deux images ont été prises, rien n'indique un changement. Les avions sont souvent garés au même endroit à des moments différents, sauf que ce ne sont pas nécessairement toujours les mêmes avions.

L'aéroport de Kaboul sert à la fois à la circulation civile et aux militaires. Il n'est pas possible d'identifier directement des types particuliers d'appareils, ce qui rend difficile la tâche de l'analyste cherchant à distinguer les avions militaires des appareils civils. On peut supposer que ces derniers seront situés dans la partie de l'aéroport destinée aux civils, laquelle se trouve se trouve au point A9, dans le secteur sud-est de l'installation. Les avions situés près de là (A10) sont probablement destinés au transport de la population civile, mais on ne peut en être sûr en se fondant uniquement sur ces images.

Le contrôle des hélicoptères

Deux secteurs semblent servir d'aires d'atterrissage pour les hélicoptères; ce sont les points H1 dans les figures 7(a), 7(b) et 7(c). Ici encore, les formes des hélicoptères sont mal définies. Il n'est possible de confirmer qu'il s'agit bien d'hélicoptères que si les appareils se trouvent à des endroits aménagés de toute évidence pour eux.

Les images des variations peuvent aider à distinguer les hélicoptères des objets fixes de la même taille. Ce type d'interprétation, qui mise beaucoup sur des paramètres connexes, est empreint d'incertitude. Tous les objets fixes à ces endroits ne sont pas nécessairement des hélicoptères. En outre, il est possible qu'un hélicoptère se trouve précisément au même endroit aux *deux* moments où des images ont été prises, ce qui donne à penser que rien n'a bougé.

Le contrôle des véhicules et des équipements

Dans les images du SPOT, dont la résolution spatiale est de 10 m ou plus, tous les véhicules militaires, à l'exception des plus gros, seront plus petits qu'un seul pixel. Néanmoins, il est concevable que des images de cette qualité renseignent jusqu'à un certain point l'observateur sur les grands mouvements de véhicules depuis un secteur donné.

Les figures 8(a), 8(b) et 8(c) montrent une partie du camp Nord-Est (N.-E.) à Kaboul. La 108e Division soviétique d'infanterie motorisée était basée à cet endroit.[16] Les zones rouges dans l'image des variations mettent en évidence les éléments foncés qui existaient en 1987, mais non en 1988. Les lignes minces au point V1 et les petits traits au point V2 correspondent peut-être à des véhicules garés en rangées et le long d'un immeuble. Les traits rouges plus épais (comme ceux au point V3) sont sans doute plusieurs rangées contiguës de véhicules.

La limite de résolution spatiale du SPOT est de toute évidence insuffisante pour permettre de détecter les véhicules individuels, mais elle suffirait peut-être pour repérer les changements dans les rangées ordonnées de véhicules. Parallèlement, les images fournissent aussi d'autres explications. Ainsi, ce sont peut-être des tentes ou des caisses d'emballage que l'on a déplacées. Il est à peu près certain que quelque chose a été déplacé, mais la limite de résolution spatiale des images est clairement trop faible pour que l'on puisse affirmer ce que c'est.

Discussion

Les techniques de détection des variations ont donné de bons résultats lorsqu'il s'est agi de repérer les zones qui avaient changé d'une image à l'autre. La capacité de détecter les mises en chantier a été clairement démontrée en ce qui concerne le secteur au nord de l'aéroport. Les déplacements d'avions et d'hélicoptères à l'aéroport étaient nettement visibles, ce qui donne à penser que des images multitemporelles émanant de satellites civils renseigneraient dans une certaine mesure sur l'intensité des activités. Les variations survenues dans les rangées de véhicules étaient évidentes elles aussi. D'après les grands changements observés dans le secteur d'entreposage situé au nord du Camp N.-E., il semble que les techniques de détection des variations permettraient de déceler tout grand mouvement de matériels depuis de tels dépôts.

Il est toutefois clair que les images ne conviennent pas vraiment au contrôle des forces militaires terrestres, sauf si l'on recherche uniquement des renseignements très superficiels. Il a été possible de situer bon nombre des installations militaires à Kaboul, mais toute interprétation plus détaillée sur les forces armées effectivement stationnées là-bas aurait été peu fiable. Il fallait en effet se guider

sur des indices indirects, tels que l'emplacement des éléments, plutôt que sur des caractéristiques plus fiables, telles que leurs formes. Il serait difficile de repérer des forces terrestres situées à des endroits non déclarés, surtout si le moindre effort était fait pour les dissimuler.

Le facteur «temps» limite aussi l'utilité des images commerciales pour le contrôle des forces militaires. *Space Media Network*, une société qui se spécialise dans la communication aux médias d'images recueillies par satellite commercial, a conclu des accords spéciaux pour obtenir en quelques jours, sur des situations évoluant rapidement, des images prises par le SPOT.[17] Cependant, ce service coûte très cher, et l'on ne peut pas y recourir régulièrement. Il faut habituellement plusieurs semaines pour livrer des images commerciales, même s'il s'agit d'images ayant déjà été acquises et classées. Vu les longs délais nécessaires pour acquérir, recevoir et analyser les images, une période considérable s'écoule entre la date de la commande et le moment où les résultats de l'analyse paraissent.

Les objets doivent être relativement gros pour ressortir sur les images recueillies par les satellites commerciaux. Ce doit être des installations permanentes, ou alors, les changements importants doivent s'opérer sur des périodes de plusieurs semaines. Voilà qui restreint beaucoup l'utilité potentielle de telles images aux fins de la vérification des retraits de forces armées. Il existe cependant d'autres applications possibles de ces images, comme le précise la partie suivante.

Partie 3 : Utilisation des images recueillies par les satellites commerciaux, aux fins de la préparation et de la planification des missions de maintien de la paix

Contexte

Le présent projet avait pour but d'examiner si les images prises par les satellites commerciaux pouvaient fournir de l'information utile à la conduite des opérations de maintien de la paix. L'histoire atteste que les missions de ce genre ont le plus souvent lieu dans des secteurs du globe dont les cartes sont d'une précision et d'une fiabilité douteuses. Les organisateurs des opérations de maintien de la paix doivent fréquemment les planifier sans avoir accès aux lieux mêmes, ou très peu. En pareilles circonstances, les images obtenues par les satellites commerciaux constituent une des quelques sources d'information possibles.

Nous avons choisi les opérations du Groupe d'assistance des Nations Unies pour la période de transition (GANUPT), qui ont commencé en avril 1989 en Namibie et en Angola, pour illustrer comment de telles images auraient pu être utiles. Le SPOT a saisi des images de quatre endroits en Namibie et en Angola, au cours de mai et de juin 1989. On a commandé des images panchromatiques de deux endroits, nommément Windhoek et Ondangwa en Namibie, et des images P + XS[18] de deux autres endroits, à savoir Operet en Namibie et N'Giva en Angola. On a aussi commandé une image numérique et une pellicule dans chaque cas, et l'on a demandé un négatif à l'échelle 1:400 000 pour chaque image panchromatique, ainsi qu'une diapositive à l'échelle 1:200 000 pour chacune des images P + XS (pellicule de format 482 mm x 482 mm).[19]

Information ayant servi à planifier les opérations de maintien de la paix en Namibie

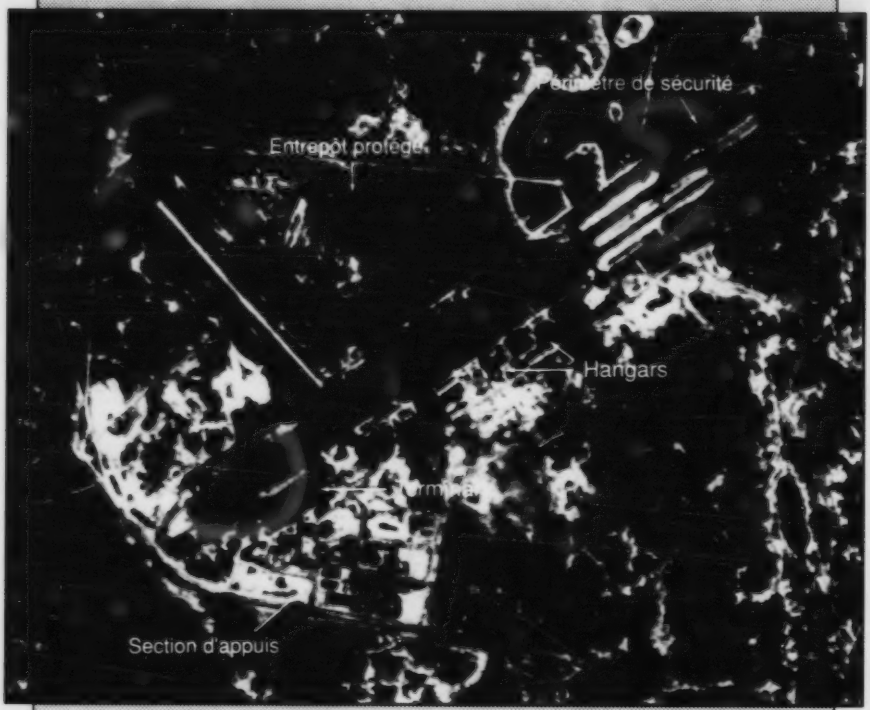
La figure 9 montre une partie d'une image panchromatique de Windhoek. Le réseau routier et les secteurs urbanisés sont clairement visibles. On a pu y déceler de nouveaux complexes domiciliaires, en comparant l'image à une carte urbaine publiée en 1984. On aperçoit quelques nouveaux éléments, et il y en a d'anciens qui ont changé. Un ancien polygone de tir a été divisé en deux par une nouvelle autoroute. Les images montrent aussi de petites routes qui ne figurent pas sur la carte. Il est possible que celles-ci soient nouvelles, ou que l'on ait décidé de ne pas les tracer sur la carte. Les forces de maintien de la paix ont néanmoins besoin de savoir où toutes les routes se trouvent, et il importe pour elles de mettre leurs cartes à jour en conséquence.

Figure 9 Comment les images recueillies par satellite commercial permettent de mettre les cartes à jour

Il est possible de mettre les cartes à jour afin d'y inclure les nouvelles zones urbaines, nouvelles routes, etc. Les zones circonscrites sur la présente image n'étaient pas urbanisées d'après une carte de Windhoek publiée en 1984. (CNES, 1989, distribution assurée par Spot-Image)

Pour bien des régions, il n'existera peut-être aucune carte qui fournira les informations voulues pour des analyses détaillées de lieux particuliers. C'est en pareilles situations que les images obtenues par les satellites commerciaux jouent un rôle précieux. Par exemple, l'*Atlas Geografico* publié par le *Ministério da Educaçao* de l'Angola donne à penser que N'Giva est un centre important : c'est la capitale de la province de Cunene; la ville est située sur l'autoroute transcontinentale et elle possède un aéroport. Cependant, les images du SPOT présentent un tableau tout autre : N'Giva mesure moins de deux kilomètres de largeur et ne semble comporter aucun immeuble de taille. L'aéroport est tout petit, et il n'y a que

Figure 10 Image panchromatique recueillie par le SPOT et montrant la base aérienne sud-africaine d'Ondangwa (Namibie)



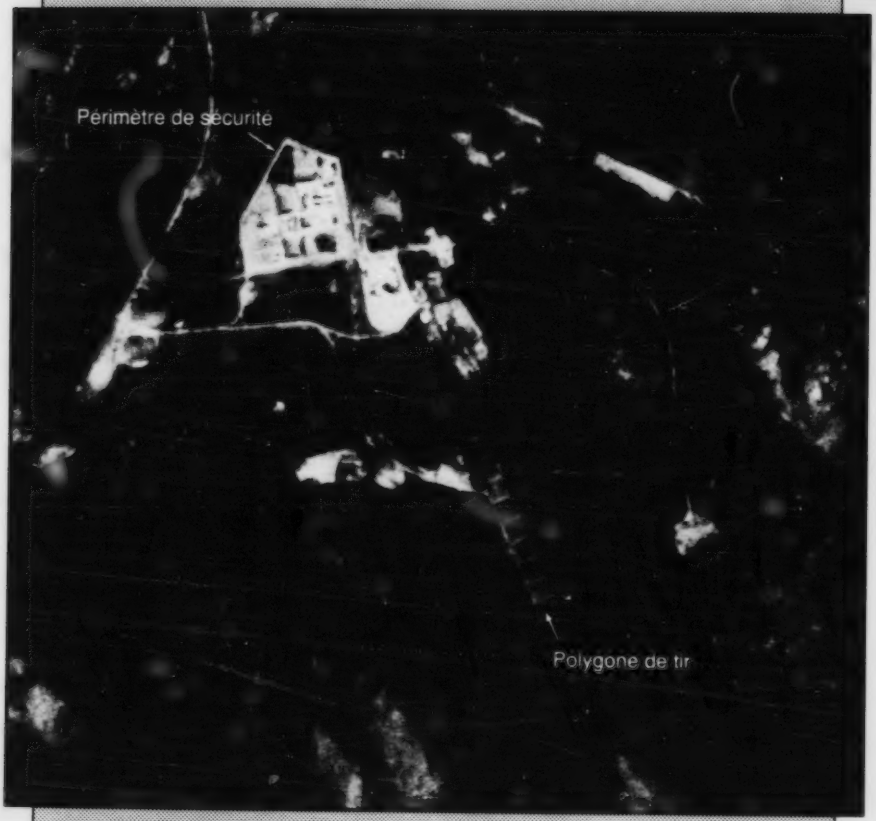
Les données recueillies par satellite donnent beaucoup plus de renseignements sur l'aéroport que les cartes topographiques. (CNES, 1999, distribution assurée par Spot-Image)

quelques installations; il n'y existe qu'une seule piste, avec de petits virages à chaque extrémité, et il ne semble y avoir aucun abri pour les avions.

Il est possible que les cartes ne révèlent pas grand-chose sur certaines installations, notamment celles à caractère militaire. Par exemple, la carte topographique à l'échelle 1:50 000 d'Ondangwa montre sommairement les pistes principales de la base aérienne sud-africaine, mais c'est à peu près tout. Les forces de maintien de la paix auraient sans doute besoin d'autres détails sur ces installations. Les images obtenues par satellite (Figure 10) en disent beaucoup plus sur les installations aéroportuaires. Ainsi, l'observateur peut y déceler :

- un périmètre de sécurité;
- la longueur et l'état des pistes;

Figure 11 Image panchromatique de Leopard Valley (Namibie) recueillie par le SPOT

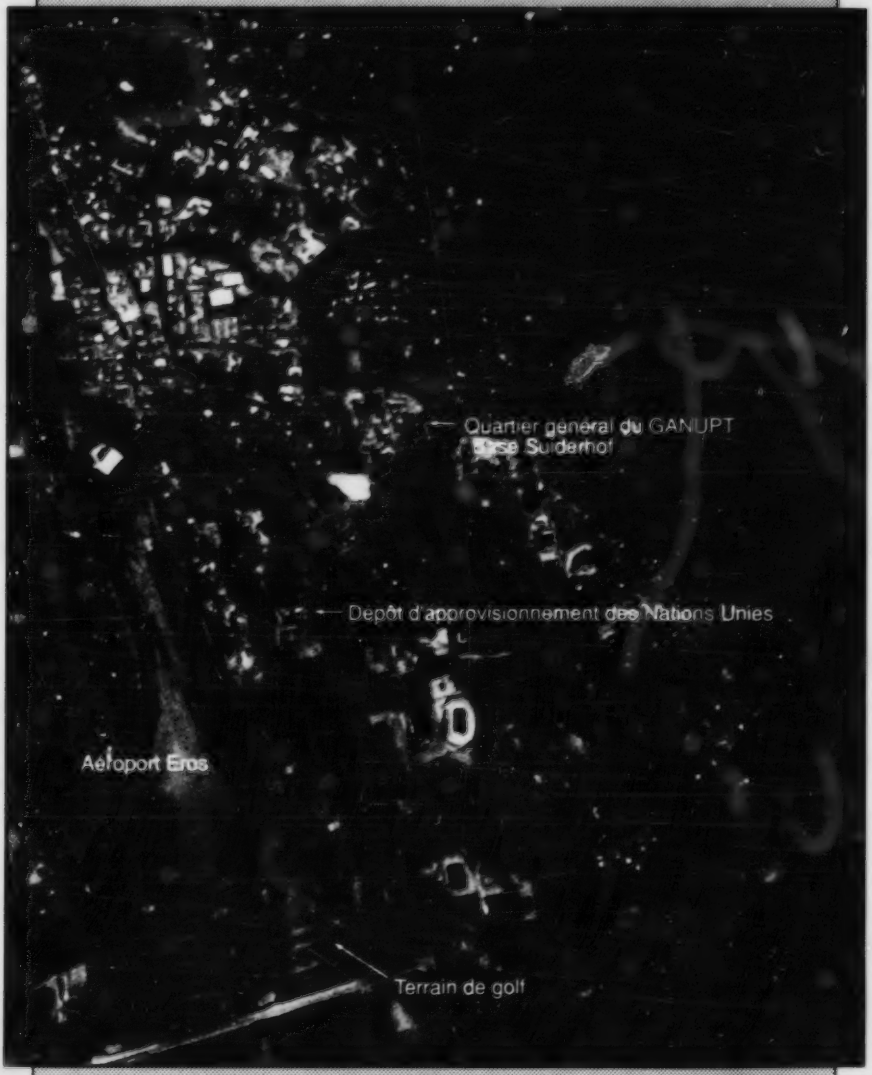


Les cartes de cette région ne donnaient pour ainsi dire aucun renseignement utile sur les installations de cette région. Les capteurs, par contre, en montrent l'aménagement général, y compris le réseau routier, l'emplacement de certains bâtiments importants et les zones entourées d'un périmètre de sécurité. (CNES, 1989, distribution assurée par Spot-Image)

- l'aérogare et les hangars;
- les dépôts de munitions et de produits pétroliers;
- les zones de soutien et d'entreposage.

La figure 11 montre une grande installation militaire sud-africaine, située au sud de Windhoek et connue sous le nom de «Leopard Valley». Les cartes topographiques de l'endroit révèlent simplement les routes et une ligne hydroélectrique

Figure 12 Image panchromatique de Windhoek, recueillie par le SPOT et montrant la zone où est installé le quartier général du GANUPT



L'ancienne base militaire de Suiderhof, qui abritait le quartier général du GANUPT, n'est pas isolée mais se trouve au centre d'une agglomération. Dans ce cas, la télédétection n'a pas suffi pour localiser la base. (CNES, 1989, distribution assurée par Spot-Image)

menant au coeur du secteur, ainsi que les contours du polygone de tir. Les images du SPOT fournissent beaucoup plus d'information, et elles renseignent bien sur l'aménagement général de l'installation, notamment sur le réseau routier, l'emplacement des principaux immeubles et la présence de périmètres de sécurité.

Certaines installations militaires risquent cependant de ne pas être très visibles sur les images émanant des satellites commerciaux. C'est le cas du quartier général du GANUPT, installé dans l'ancienne base sud-africaine de Suiderhof (Figure 12). En effet, l'endroit est entouré de secteurs urbains et ne possède aucune caractéristique qui permettrait de le désigner comme étant une installation militaire. Si l'observateur ne connaît pas personnellement l'endroit, il ne pourra identifier de telles installations avec des images provenant de satellites commerciaux. Si l'on connaissait précisément l'emplacement d'une installation au préalable, les images pourraient être utiles pour en étudier davantage l'aménagement général.

Discussion

Les images recueillies par les satellites commerciaux peuvent s'avérer utiles aux stades de la préparation et de la planification des opérations de maintien de la paix, et ce, à bien des égards. Même en dépit de leurs limites, ces images permettent d'améliorer considérablement la qualité de l'information dont on dispose pour la planification, au stade initial de la préparation de l'opération. Les organisateurs des opérations de maintien de la paix doivent fréquemment faire la planification sans avoir accès aux lieux mêmes, ou très peu. Les cartes risquent d'être périmées ou d'avoir été dressées à des échelles peu pratiques.

Les images provenant de satellites commerciaux sont utiles pour déceler les secteurs ayant été modifiés; on compare alors les images à une carte topographique du même endroit. Il est plus facile de repérer les changements apportés à la périphérie d'une ville que ceux s'étant opérés à des endroits que la carte désigne comme ayant déjà été aménagés. On peut retrouver les secteurs ayant subi des changements dans une ville si l'utilisation des terrains a clairement varié et que les images permettent d'observer un tel état de choses. Les images peuvent aussi fournir des renseignements généraux sur les installations militaires ne figurant pas sur les cartes, ou au sujet desquelles il existe très peu d'information. Dans certains cas, quand les cartes ne conviennent pas aux besoins à cause de leur qualité ou de leur échelle, les images émanant des satellites commerciaux sont souvent la *seule* source fiable d'information.

Le délai requis normalement quand on commande des images ne poserait pas nécessairement un problème grave dans le cas des opérations de maintien de la paix. Les premiers signes indiquant qu'une telle opération aura sans doute lieu

peuvent se manifester des mois, sinon des années avant qu'un engagement formel soit pris en ce sens. Par ailleurs, une bonne partie de l'information tirée des images fournies par les satellites pourrait être utile un an après, ou même plus.

Les images sont habituellement fournies sur pellicule ou sur support numérique. Une pellicule sera quasi certainement nécessaire tôt ou tard, mais il y a des avantages à commander une version numérique. Avec une image numérique, on peut copier une partie de l'image sur la pellicule à *n'importe quelle* échelle, sans perdre aucune information. Les images de la Namibie employées dans le présent rapport ont été copiées sur pellicule à une échelle de 1:25 000, puis l'on en a tiré des épreuves par contact à la même échelle. Si l'on avait agrandi ces images à partir d'une pellicule photographique, à une échelle de 1:400 000 ou de 1:200 000, on aurait perdu une partie des fins détails spatiaux, ce qui aurait amoindri l'utilité des images.

Il existe des images à bande unique, telles que les images panchromatiques du SPOT (10 m), et des images multispectrales à plusieurs bandes. Pour la plupart des besoins propres aux opérations de maintien de la paix, les images multispectrales présentent plus d'inconvénients que d'avantages. Dans ce contexte, ces dernières permettraient de déjouer les tentatives de ceux qui chercheraient à camoufler du matériel militaire, et ce serait sans doute là leur principale utilité. Cependant, la résolution spatiale des images émanant des satellites commerciaux et le délai qu'il faut pour les obtenir en limitent l'utilité aux fins des opérations de maintien de la paix. Parallèlement, une pellicule couleurs est nécessaire pour produire les épreuves des images multispectrales, tandis qu'une pellicule noir et blanc suffit dans le cas des images panchromatiques à bande unique. Les épreuves en noir et blanc coûtent moins cher, on peut les obtenir en grandes dimensions, et elles sont en général plus faciles à utiliser.

Partie 4 : Les systèmes aéroportés commerciaux employés pour le contrôle dans le contexte de la vérification ou du maintien de la paix

Contexte

Le présent document vise à étudier l'utilité des systèmes de télédétection pour la surveillance aérospatiale aux fins de la vérification ou du maintien de la paix.

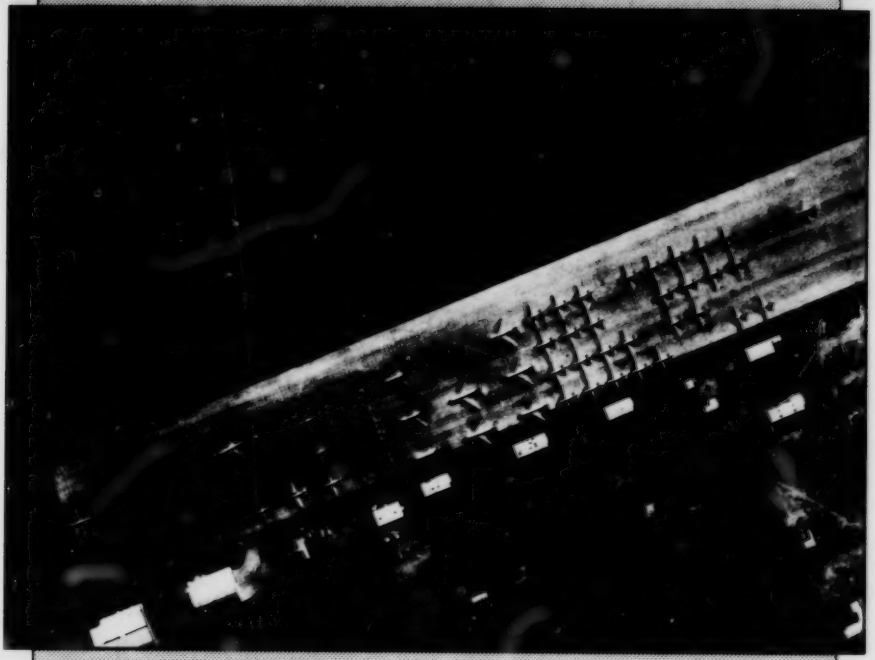
Jusqu'à maintenant, on a rarement utilisé ces systèmes à de telles fins. Les systèmes aéroportés font partie des Moyens techniques nationaux (MTN) que les États-Unis et l'URSS emploient pour vérifier le respect de leurs accords bilatéraux, et les deux superpuissances recueillent les données nécessaires à l'aide d'une série d'appareils perfectionnés. À ce jour, les systèmes de reconnaissance aéroportés n'ont été inclus dans aucun accord multilatéral.

L'Accord sur les mesures de renforcement de la confiance et de la sécurité en Europe, signé à Stockholm en 1986, autorise les inspections aériennes, mais il limite l'accès aux avions aux observateurs humains, par conséquent, aucun capteur n'est permis à bord, bien que les inspecteurs puissent se servir d'appareils photographiques et de lunettes d'approche. Toutefois, l'Accord ne permet pas l'usage d'appareils photos aéroportés ni d'autres dispositifs de télédétection.

En revanche, l'on a quelquefois utilisé la télédétection aéroportée pour le maintien de la paix. Au cours du processus de dégagement des forces dans le Sinaï (entre 1972 et 1979), on s'est souvent servi d'avions de reconnaissance américains.[20] Le terrain montagneux du Yémen a obligé la Mission d'observation des Nations Unies à utiliser huit avions de reconnaissance, mais à ce jour, les données pour la plupart des opérations de maintien de la paix ont été recueillies par des observateurs au sol.

Les systèmes de télédétection aéroportés seront tout probablement appelés à jouer un plus grand rôle dans l'avenir pour renforcer la confiance et pour vérifier l'observance des accords sur la limitation des armements. Par exemple, la reconnaissance aérienne pourrait contribuer beaucoup à la vérification du respect d'un traité sur les forces conventionnelles en Europe (FCE). Des négociations sont par ailleurs en cours relativement à une mesure de confiance particulière, soit un traité sur l'ouverture des espaces aériens qui permettrait les vols de reconnaissance entre l'Oural et l'Atlantique.

Figure 13 Les photographies aériennes conventionnelles constituent une source économique et fiable d'informations



Avec des indices comme les dimensions des appareils et la forme des ailes, on peut identifier plusieurs types d'aéronefs à partir de ce cliché panchromatique d'un terrain d'aviation. (Gracieuseté de David M. Dorschner, Aviation Resource Management)

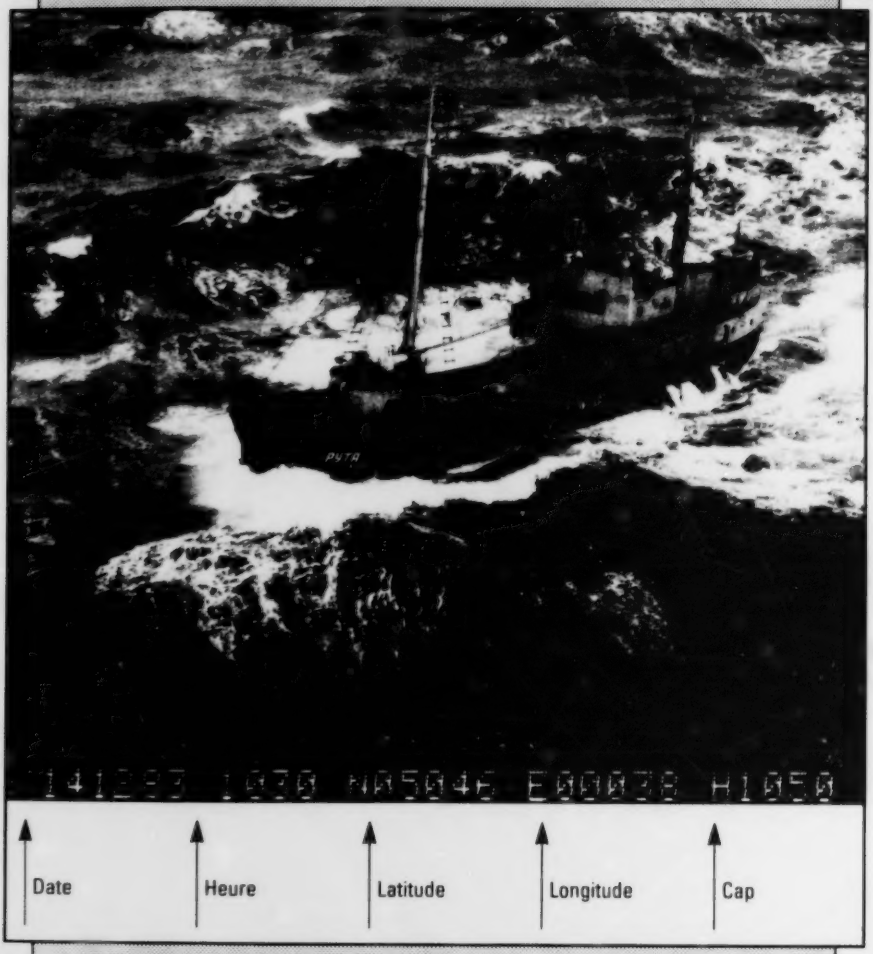
Il se peut aussi que les systèmes de reconnaissance aérienne aient un plus grand rôle dans les opérations de maintien de la paix. C'est pour cela que le Gouvernement du Canada a récemment remis à l'ONU un rapport, intitulé *Overhead Remote Sensing for United Nations Peacekeeping*,[21] qui décrit sommairement les capacités de ces systèmes. Ce rapport, présenté au Secrétaire général le 21 mai 1990, a été en grande partie tiré des recherches résumées ici.

Voyons maintenant comment la surveillance par capteurs aéroportés pourrait être utile pour la vérification du respect des traités et le maintien de la paix.

Le contrôle avec des capteurs aéroportés commerciaux

La photographie aérienne peut fournir des clichés d'une très haute résolution spatiale, particulièrement si l'avion peut survoler l'endroit visé à basse altitude.

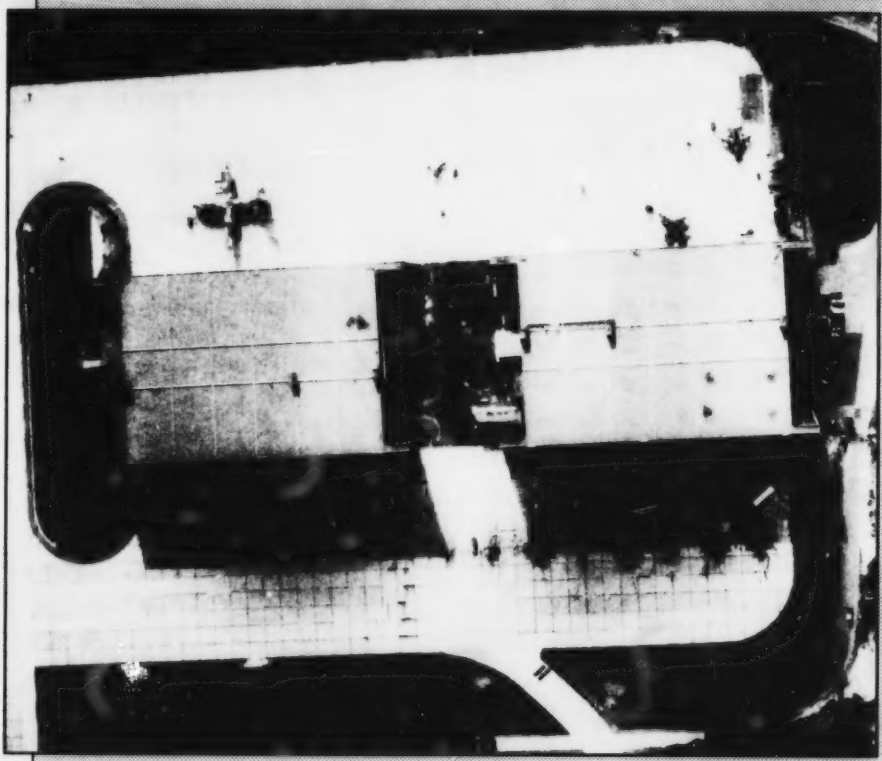
Figure 14 Les appareils photos portatifs peuvent fournir des vues obliques très détaillées



Le dispositif utilisé pour ce cliché était relié au système de navigation de l'avion, ce qui a permis d'indiquer les données de base du vol sur chaque cliché. (Gracieuseté de Negretti Aviation, Division Croydon)

Par contre, elle ne permet pas l'«affichage» en temps réel, car on doit développer les clichés avant de pouvoir les regarder; c'est pourquoi elle se prête mieux aux situations où l'on désire conserver des données visuelles détaillées.

Figure 15 Photographie aérienne panchromatique prise de jour, et images recueillies de nuit

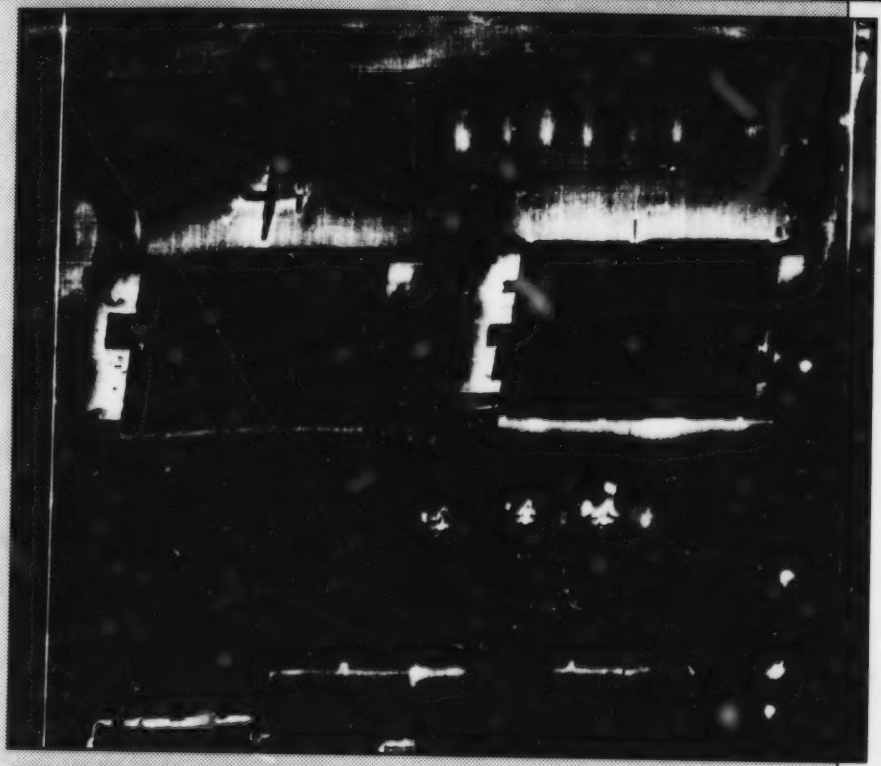


Ces deux méthodes fournissent des renseignements qui se complètent mutuellement. La photographie aérienne (c-dessus) a été prise six heures environ après l'image infrarouge (page suivan Cette dernière montre les véhicules et aéronefs chauds, les bâtiments chauds et les canalisation

La photographie aérienne verticale se prête plus à la surveillance de *régions* qu'à celle d'*objets* (Figure 13). On recueille généralement les photographies aériennes verticales en bandes afin d'obtenir une image continue du terrain le long de la trajectoire de l'aéronef; pour les très grandes surfaces, l'aéronef passe plusieurs fois, en suivant des trajectoires parallèles et décalées. Le plus souvent, celles-ci se chevauchent, ce qui donne des clichés stéréoscopiques.

On pourrait laisser bien en vue l'équipement que l'on aurait détruit selon les clauses d'un traité, et en prendre des photographies aériennes verticales pour conserver dans les dossiers. L'échelle des clichés est idéale pour compter les objets

par un scanneur linéaire infrarouge thermique

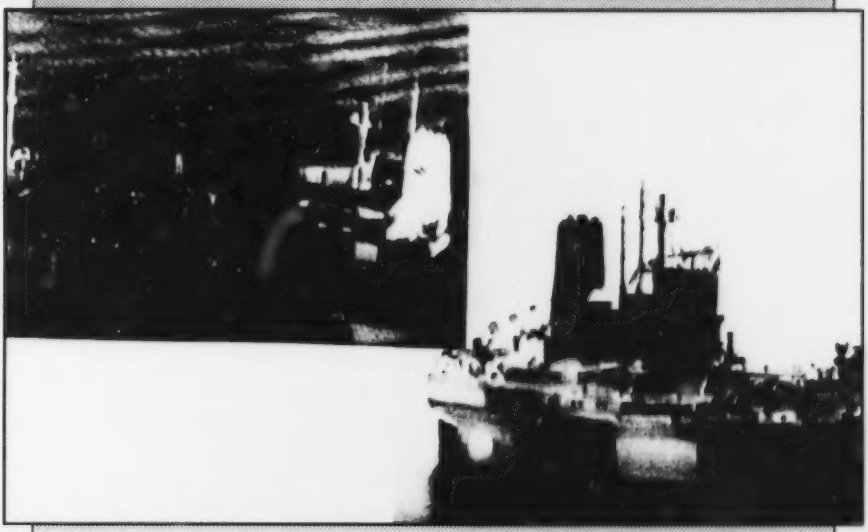


vapeur souterraines, ainsi que les traces chaudes laissées sur le sol par les réacteurs. La photographie aérienne donne une meilleure résolution spatiale que l'image infrarouge. (Gracieuseté du ministère de la Défense nationale du Canada)

répartis sur une grande surface, et la haute résolution spatiale permettrait même d'identifier des équipements montrés.

Des photographies obliques prises avec des appareils portatifs, comme celle de la figure 14, peuvent fournir des preuves probantes du respect ou de la violation d'un traité. Grâce à une interface avec le système de navigation de l'aéronef, la date, l'heure et l'emplacement sont indiqués sur la photographie même, plus précisément sur le bord inférieur. Les détails fournis par la photographie permettent d'identifier avec certitude les objets en question.

Figure 16 Images de navires marchands obtenues à l'aide d'un FLIR



Points importants : observez la cheminée chaude dans l'image de gauche, et la possibilité de «voir» à travers les coques, grâce à la différence de chaleur à la surface de celles-ci, selon le contenu des cales. (Gracieuseté de David M. Dorschner, Aviation Resource Management)

Les systèmes infrarouges (IR) thermiques, que l'on peut utiliser la nuit, sont le complément des appareils photographiques et des dispositifs à transfert de charge (DTC). Vu leur utilité la nuit, les scanneurs IR linéaires complètent bien les systèmes panchromatiques aéroportés; on les règle d'habitude pour enregistrer de longues bandes d'images (Figure 15).

Les radars IR à balayage vers l'avant (FLIR) se prêtent mieux à l'acquisition d'images obliques et à l'affichage de données en temps réel. Un technicien peut orienter le FLIR vers un objet (par exemple, le navire de la figure 16) et continuer à l'observer pendant que celui-ci se déplace ou que l'aéronef décrit des cercles au-dessus de lui. On peut aussi brancher sur les FLIR un dispositif qui permet d'indiquer dans la marge de l'image des renseignements complémentaires comme la date, l'heure et l'emplacement géographique de l'objet.

La résolution des systèmes IR thermiques est plus basse que celle des appareils photographiques aériens, mais ils sont quand même assez précis pour permettre de distinguer la plupart des types d'équipement; dans la figure 17, il est possible de distinguer plusieurs types d'aéronefs. Comme pour la photographie

Figure 17 Images d'aeronefs a une base militaire, obtenues a l'aide d'un scanneur lineaire infrarouge

On peut identifier plusieurs types d'aéronefs. Des ombres thermiques (indiquées par les flèches) demeurent là où des aéronefs étaient stationnés pendant la journée. (Gracieuseté du ministère de la Défense nationale du Canada)

aérienne, la précision de l'image infrarouge dépend en partie de la distance entre l'objet visé et le capteur; si l'on désire plus de détails, on essaiera tout simplement de voler plus bas.

Jusqu'à un certain point, les images thermiques peuvent donner des indices sur le degré d'activité dans la région visée. Par exemple, les moteurs de véhicules restent suffisamment chauds après avoir tourné pour que l'on puisse le détecter, ce qui indique un déplacement récent. On peut distinguer sur la figure 17 des ombres thermiques : des avions ont été stationnés sur la piste pendant la journée, et leur ombre a gardé le sol plus froid. Plus tard dans la journée, on peut encore distiguer les ombres thermiques, même si les avions ont disparu. Certains FLIR peuvent même détecter la chaleur dégagée par le corps humain lorsqu'on les utilise à basse altitude, ce qui serait utile à des forces de maintien de la paix pour détecter des infiltrations transfrontalières nocturnes.

Dans certaines régions, comme l'Europe ou l'Amérique centrale, il serait essentiel de posséder des moyens de reconnaissance tous temps. Les systèmes décrits ci-haut ne peuvent pas percer les nuages, mais les radars à ouverture

Figure 18. Images d'un aérodrome recueillies par un radar à ouverture synthétique (ROS)

Cette image a été prise avec un ROS d'une résolution de 3 m x 3 m. Les points brillants correspondent à des avions dans l'aire de stationnement; les pistes d'asphalte et la rivière absorbent une bonne partie des ondes radar, et c'est pourquoi elles apparaissent comme des secteurs foncés dans l'image. Les clôtures semblent blanches, surtout si elles étaient parallèles à la trajectoire de l'avion lorsque l'image a été prise. (Gracieuseté d'Intera Technologies Ltd.)

synthétique (ROS) aéroportés offerts sur le marché le peuvent, bien qu'ils n'offrent pas la même résolution spatiale que la photographie aérienne ou les systèmes IR thermiques.

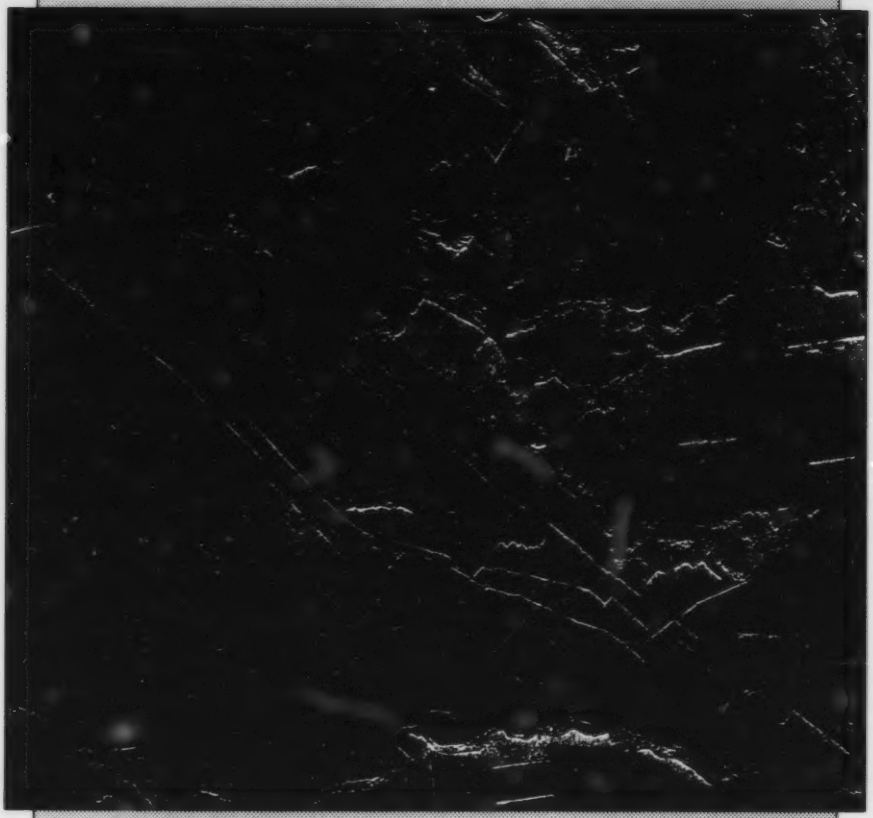
Heureusement, de nombreux objets d'intérêt particulier pour la vérification du respect des traités sur la limitation des armements ou pour le maintien de la paix sont d'excellents réflecteurs radar. Véhicules terrestres, aéronefs et navires paraissent tous très brillants dans les images radar, ce qui en rend la détection facile. Par exemple, plusieurs avions sont clairement visibles sur le sol, dans la figure 18,

Figure 19 Images de destroyers à l'ancre, recueillies par un ROS

Les destroyers (points blancs) dans la partie inférieure de cette image ROS sont facilement repérables, mais plus difficiles à identifier. De même, il est facile d'y repérer de nombreuses caractéristiques d'un endroit habité (routes, quartiers, aéroport). (Gracieuseté d'Intera Technologies Ltd.)

tandis que les points blancs, dans la figure 19, sont des destroyers à l'ancre. Bien que les aéronefs et les navires soient facilement perceptibles, les images ne fournissent pas suffisamment de données pour que l'on puisse identifier précisément les types d'aéronefs ou de navires.

Figure 20 Utilité potentielle des images obtenues par un ROS pour la surveillance des zones frontalières



Le vaste corridor de balayage du ROS et la grande distance de sécurité à laquelle on s'en sert le rendraient particulièrement utile pour la surveillance des zones frontalières. (Gracieuseté d'Intera Technologies Ltd.)

Les ROS aéroportés peuvent surveiller de grandes surfaces : avec un couloir couvert d'environ 25 km, la plupart peuvent recueillir en une seule mission des données sur de vastes zones. Un biturbopropulseur muni d'un ROS peut, en quatre heures, obtenir une image de toute la côte de la Namibie (1 350 km).

Un ROS aéroporté est généralement utilisé à une distance de sécurité considérable; on peut donc s'en servir pendant un exercice militaire, sans survoler la région visée. On pourrait aussi surveiller régulièrement une frontière de loin, ce

qui permettrait à des forces de maintien de la paix d'être informées tôt sur les mouvements de véhicules et d'équipement militaires vers la frontière, ou sur la construction de ponts en vue du franchissement d'une rivière.

Discussion

Une large gamme de systèmes de télédétection aéroportés, qui seraient utiles pour la vérification du respect des traités ou le maintien de la paix, existent sur le marché. Le capteur ou l'avion à usage universel n'existe pas encore, mais il est possible d'établir des combinaisons capteurs/aéronef qui se prêtent bien à la plupart des situations.

En combinant un appareil photographique aérien et un scanneur infrarouge linéaire, on peut recueillir des images du sol à n'importe quelle heure. On peut obtenir des données en temps réel avec des appareils photos DTC, le jour et des FLIR, la nuit. Les ROS, quant à eux, possèdent des capacités tous temps.

Les systèmes de reconnaissance aéroportés sont souples d'emploi; de fait, il est possible d'adapter à une tâche particulière tant l'équipement que l'aéronef. En survolant un endroit à une altitude ou une vitesse différente, on peut obtenir des images à une échelle ou à une heure précise. Les images peuvent être produites en temps réel dans l'aéronef, transmises à une station au sol, ou enregistrées sur support optique ou magnétique pour examen ultérieur.

Les systèmes aéroportés se prêtent particulièrement bien à la vérification multilatérale et aux opérations de maintien de la paix. En effet, de nombreux pays qui ne peuvent ni financer ni exploiter un système perfectionné de télédétection par satellite disposent des moyens financiers et techniques nécessaires à la reconnaissance aérienne. En limitant la portée des vols de reconnaissance et en autorisant la présence des représentants du pays survolé à bord de l'aéronef pendant les missions de reconnaissance, on pourrait rendre ces dernières acceptables du point de vue politique, car le pays hôte s'assurerait ainsi qu'aucune image non autorisée ne serait prise.

Les aéronefs et les systèmes de télédétection offerts sur le marché pourraient favoriser la vérification en collaboration. Le pays survolé pourrait, par exemple, demander à inspecter l'aéronef ou à placer des observateurs à bord. Ainsi, les utilisateurs de capteurs commerciaux éviteraient d'être accusés d'espionnage (ce qui ne serait pas le cas s'ils recouraient à des systèmes de reconnaissance militaires spécialisés), tout en étant quand même en mesure de recueillir des données très précieuses pour la vérification du respect des traités sur la limitation des armements ou pour le maintien de la paix.

Conclusion

Les systèmes de télédétection commerciaux peuvent être très utiles pour la vérification du respect des traités sur la limitation des armements et sur le maintien de la paix. Les dispositifs imageurs montés sur satellite fourniraient les données nécessaires à la planification des opérations de maintien de la paix, tandis que leur contrepartie aéroportée pourrait fournir des renseignements plus détaillés pour la vérification du respect des traités ou le maintien de la paix. Sur ce plan, les satellites et les aéronefs se complètent et peuvent devenir deux éléments importants d'un système de contrôle multimode à plusieurs paliers, d'autant plus qu'il est possible d'exercer un contrôle nuit et jour, quel que soit le temps, grâce à l'équipement existant sur le marché.

Les satellites commerciaux ne se prêtent pas bien à la surveillance directe des troupes au sol, mais les images fournies par ces systèmes sont très utiles pour examiner les reliefs plus gros et plus permanents du terrain visé. Les données ainsi obtenues seraient précieuses notamment pour la planification initiale des opérations de maintien de la paix, car il faut alors des renseignements généraux afin de mettre à jour les cartes de la région en y indiquant notamment les nouvelles routes et les nouveaux éléments tels que les installations militaires.

Les systèmes aéroportés fournissent des images plus à jour et d'une plus haute résolution spatiale que les imageurs satellites commerciaux. Les appareils aéroportés se prêtent donc mieux à la surveillance directe des forces armées, aux fins du maintien de la paix ou de la vérification du respect des traités. Si l'on devait utiliser des systèmes commerciaux aéroportés, les capteurs et les aéronefs pourraient être inspectés avant le début des missions de reconnaissance, par le pays devant être survolé.

Même si les systèmes de télédétection commerciaux existants ressemblent à certains points de vue aux systèmes militaires de reconnaissance, ils seraient très probablement utilisés dans des contextes très différents. En effet, les systèmes commerciaux seraient plus appropriés pour le maintien de la paix ou la vérification mutuelle du respect des traités que les dispositifs militaires : la nécessité de protéger la technologie militaire secrète empêche habituellement l'utilisation dans de telles situations. De plus, il faudrait offrir à tous les signataires d'un traité l'accès aux moyens de contrôle destinés à la vérification, afin d'empêcher que certains se sentent lésés. Le contrôle exercé aux fins du maintien de la paix s'impose généralement dans des situations où la confiance entre les parties est fragile; dans certains cas, le recours à des équipements militaires perfectionnés risquerait de miner toute confiance qui aurait pu s'instaurer entre elles.

Notes

1. Lillesand, Thomas M. et Ralph W. Kiefer, *Remote Sensing and Image Intrepretation*, p. 1, John Wiley & Sons, New York, 1979.

2. Dans l'hémisphère occidental, la maison *Central Trading Systems Inc.* possède les droits exclusifs de commercialisation des images de *Soyuzkarta*.

3. Grâce à cette caractéristique, le SPOT permet aussi d'obtenir des couples de clichés d'un endroit donné, en photographiant celui-ci à des angles différents, pendant des passages différents le long de trajectoires voisines. Voilà qui est important pour les cartographes, mais nous ne nous y arrêterons pas ici.

4. *SPOT User's Handbook. Volume 1: Reference Manual, Toulouse*, CNES, Image SPOT, 1988, p. 1-21.

5. Le pas d'échantillonnage linéaire, qui détermine la résolution spatiale du système dans l'axe perpendiculaire à la trajectoire au sol, est fonction de l'espace séparant les divers détecteurs à transfert de charge (DTC) présents dans les antennes. Le pas d'échantillonnage des colonnes, qui détermine la résolution spatiale dans l'axe longitudinal, est fonction du temps s'écoulant entre le relevé de deux lignes successives.

6. G. Calhes et Y. Trempat, «Exploitation of the SPOT System», *Geocarto International* 3 (1986), p. 20.

7. Le Landsat-3 disposait aussi d'une bande infrarouge thermique sensible aux ondes de 10,4 à 12,6 µm. Cependant, la voie thermique s'est avérée très bruyante, ce qui en a limité l'utilisation.

8. À moins d'être muni d'un flash.

9. Dans certaines circonstances, il est possible de prendre des photos par temps couvert, mais celles-ci ne présentent alors pas d'ombre et que de faibles contrastes.

10. On peut obtenir des images thermiques en volant sous une couche nuageuse égale, mais celles-ci présentent généralement un faible contraste thermique.

11. Adaptation fondée sur *Airborne Remote Sensing for C.F.E. Verification: The Platform*, Toronto, Boeing Canada, Division de Havilland, Rapport SER-8-2295, juin 1989, p. 7.

12. Ces avions sont typiques de certaines catégories d'appareils. En les choisissant ici, nous ne leur accordons aucune sanction particulière.

13. Le Département d'État américain estime que les effectifs soviétiques ont atteint 120 000. D'après une déclaration faite le 26 mai 1988 par le maréchal Sergei Akhromeyev, Chef d'état-major des forces armées soviétiques, le Contingent limité des Forces soviétiques en Afghanistan comptait 100 300 hommes.

14. Craig Karp, «Afghanistan: Eight Years of Soviet Occupation», *Department of State Bulletin* vol. 88, nº 2132, mars 1988, p. 2.

15. Le mot est dérivé des termes anglais «*pi*cture» et «*el*ement» (élément d'image); c'est la plus petite surface homogène constitutive d'une image enregistrée par un système informatique et pouvant être transmise.

16. David C. Isby, *Weapons and Tactics of the Soviet Army*, Londres, Jane's Publishing Company, 1988, p. 34.

17. Christer Larsson, *Space Media Network*. Communication personnelle.

18. Image fournie par le SPOT; elle résulte d'une fusion d'images panchromatiques (P) et multispectrales (XS) d'un endroit donné, obtenues simultanément. On obtient ainsi une image multispectrale dont la résolution spatiale réelle est de 10 m.

19. À cause des problèmes que suppose l'impression des diapositives de cette taille en couleurs, SPOT-Image a par la suite fourni une diapositive de 241 mm × 241 mm à l'échelle 1:200 000, qui visait un secteur précis de chaque image.

20. Brian S. Mandell, *L'expérience du Sinaï : Quelques leçons en matière de méthodes pluralistes de vérification du contrôle des armements et de gestion des risques*, (Ottawa : Ministère des Affaires extérieures, 1987), *Études ponctuelles sur la vérification du contrôle des armements*, nº 3, p. 13.

21. *Overhead Remote Sensing for United Nations Peacekeeping* (Ottawa : Gouvernement du Canada, avril 1990).

Bibliographie

Systèmes commerciaux de télédétection — Renseignements généraux

Colwell, Robert N., *Manual of Remote Sensing*, 2e édition, Falls Church (Virginie), American Society of Photogrammetry, 1983.

Geocarto International, nº 3, 1986. (Numéro spécial portant sur le SPOT.)

Lillesand, T.M. et Kiefer, R.W., *Remote Sensing and Image Interpretation*, New York, John Wiley & Sons, 1979.

Utilisation des satellites commerciaux pour des tâches reliées à la sécurité

Bulletin of the Atomic Scientists, vol. 45, nº 7, 1989. (Numéro mettant l'accent sur l'incidence des satellites d'observation commerciaux dans le domaine de la sécurité)

Florini, Ann M., «The Opening Skies: Third-Party Imaging Satellites and U.S. Security», *International Security*, vol. 13, nº 2, p. 91-123.

Jasani, B. et Sakata, T., *Satellites for Arms Control and Crisis Monitoring*, Oxford, Oxford University Press, 1987.

Krepon, Michael *et al.*, *Commercial Observation Satellites and International Security*, New York, St. Martin's Press, 1990.

Office of Technology Assessment, Congrès américain, *Commercial Newsgathering from Space — A Technical Memorandum*, Washington (D.C.), US Government Printing Office, 1987. OTA-TM-ISC-40.

Skorve, Johnny, «Commercial and Third-Party Satellites», dans *Verification of Conventional Arms Control in Europe*, sous la direction de Richard Kokoski et Sergey Koulik, Boulder (Colorado), Westview Press, 1990, p. 56-88.

Skorve, Johnny et Ries, Tomas, *Investigating Kola: A Study of Military Bases Using Satellite Photography*, Londres, Brassey's Defence Publishers, 1987.

Zimmerman, P., «A New Resource for Arms Control», *New Scientist*, 23 septembre 1989, p. 38-43.

Utilisation des systèmes commerciaux aériens pour des tâches reliées à la sécurité

Banner, Allen V., Young, Andrew J., et Hall, Keith W., *Aerial Reconnaissance for Verification of Arms Limitation Agreements: An Introduction*, Genève, Institut de recherche des Nations Unies sur le désarmement (à paraître).

Canada, *Open Skies: Technology for the 1990's*, Document d'information nº 4, Ottawa, Direction du contrôle des armements et du désarmement, Affaires extérieures et Commerce extérieur Canada, 23 février 1990.

Canada, *Overhead Remote Sensing for United Nations Peacekeeping*, Ottawa, Gouvernement du Canada, avril 1990.

Cleminson, F.R., «Aerial Monitoring for Verification Purposes», dans *Unconventional Approaches to Conventional Arms Control Verification — An Exploratory Assessment*, sous la direction de John Grin et de Henry Van der Graaf, St. Martin's Press, New York, 1990.

Mandell, Brian S., *L'expérience du Sinaï : Quelques leçons en matière de méthodes pluralistes de vérification du contrôle des armements et de gestion des risques*, Ottawa, ministère des Affaires extérieures, 1987, Études ponctuelles sur la vérification du contrôle des armements nº 3.

Slack M., et Chestnutt, H., *Open Skies, Technical, Organizational, Operational, Legal and Political Aspects*, Toronto, Centre d'études internationales et stratégiques, Université York, 1990.

Spitzer, Hartwig, «Aerial Observation and Overflights», dans *Verification of Conventional Arms Control in Europe*, sous la direction de Richard Kokoski et de Sergey Koulik, Boulder (Colorado), Westview Press, 1990, p. 89-122.

Études ponctuelles sur la vérification du contrôle des armements

N° 1 Garanties de l'Agence internationale de l'énergie atomique. Observations sur les leçons applicables à la vérification découlant d'une convention sur les armes chimiques, par James F. Keeley, novembre 1988

N° 2 Vérification d'un accord de paix en Amérique centrale, par H.P. Klepak, février 1989

N° 3 International Atomic Energy Agency Safeguards as a Model for Verification of a Chemical Weapons Convention, H. Bruno Schiefer et James F. Keeley, éd., juillet 1989 (publié en anglais seulement)

N° 4 Le contrôle des armements conventionnels et le désarmement en Europe : Un modèle pour l'appréciation de l'efficacité du système de vérification, par James W. Moore, mars 1990

N° 5 Considérations de sécurité et vérification d'un régime de contrôle des armements en Amérique centrale, par H.P. Klepak, août 1990